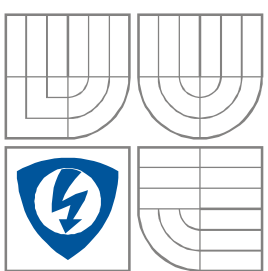
	<p>VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY</p>
	<p>FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY</p> <p>FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS</p>

MIKROPÁSKOVÁ ANTÉNA S KRUHOVOU POLARIZACÍ S MOŽNOSTÍ VÝBĚRU TYPU POLARIZACE

DUAL-PORT MICROSTRIP CIRCULARLY-POLARISED ANTENNA

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Karel Holek

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Zbyněk Lukeš, Ph.D.

BRNO, 2008

LICENČNÍ SMLOUVA

POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Bc. Karel Holek
Bytem: Bzenecká 20, Brno, 628 00
Narozen/a (datum a místo): 12. prosince 1983 v Brně

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida, předseda rady oboru Elektronika a sdělovací technika
(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- ☐ disertační práce
- ☒ diplomová práce
- ☐ bakalářská práce
- ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako
(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Mikropásková anténa s kruhovou polarizací s možností výběru typu polarizace

Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Zbyněk Lukeš, Ph.D.

Ústav: Ústav radioelektroniky

Datum obhajoby VŠKP: _____

VŠKP odevzdal autor nabyvateli*:

- ☒ v tištěné formě – počet exemplářů: 2
- ☒ v elektronické formě – počet exemplářů: 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.

3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.

4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

* hodící se zaškrtněte

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ☒ ihned po uzavření této smlouvy
 - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
 - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
 - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
 - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 30. května 2008

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Abstrakt

Cílem práce bylo navrhnout a realizovat vhodnou mikropáskovou anténu s kruhovou polarizací s možností výběru typu polarizace pro kmitočet 2,4 GHz. V první části diplomové práce jsou popsány všeobecné poznatky o mikropáskových anténách, kruhové polarizaci, možnostech napájení, používaných substrátech atd. Druhá část práce se zabývá návrhem a simulacemi antén, pomocí programů CST Microwave Studio a Zeland IE3D. V poslední části je uvedeno srovnání simulací s výsledky měření.

Mikropásková anténa, kruhová polarizace, dvouportová anténa, RFID anténa

Abstract

The thesis is focused at the design and the execution of a dual-port microstrip circularly-polarized antenna for the frequency of 2.4 GHz. The first part describes general knowledge about microstrip antennas, circularly-polarized, options of power supply, used medium etc. The second part of the thesis deals with the design and simulation of antennas with the use of software called CST Microwave Studio and Zeland IE3D. In the last part, confrontation of simulation and measurement results is provided.

Microstrip antenna, circularly polarized, dual-port antenna, RFID antenna

Bibliografická citace mé práce:

HOLEK, K. Mikropásková anténa s kruhovou polarizací s možností výběru typu polarizace. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 50 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Zbyněk Lukeš, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Mikropásková anténa s kruhovou polarizací s možností výběru typu polarizace jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 30. května 2008

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Zbyňku Lukešovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne 30. května 2008

.....
podpis autora

Obsah

Seznam obrázků	8
Seznam tabulek	9
1 Úvod	10
2 Teoretická část	11
2.1 Mikropásková anténa	11
2.2 Typy mikropáskových antén	12
2.3 Kruhová polarizace	12
2.4 Způsoby napájení	15
2.5 Substráty	16
3 Návrh antény	18
3.1 Oříznutá anténa	20
3.1.1 Vliv minimální hodnoty S_{11} na šířku pásma	22
3.1.2 Volba substrátu	23
3.1.3 Simulace v programu IE3D	27
3.1.4 Kruhový motiv	28
3.2 Skoro čtvercová anténa	28
3.2.1 Návrh pomocí programu CPPATCH	29
3.2.2 Jeden rezonanční kmitočet	31
3.2.3 Dva rezonanční kmitočty	35
3.2.4 Vzduchové dielektrikum	42
3.2.5 Výsledky simulací	42
4 Srovnání s vyrobenou anténou	43
4.1 Oříznutá anténa	43
4.2 Skoro čtvercová anténa	45
5 Závěr	49
Použitá literatura	50

Seznam obrázků

Obr. 2.1: Geometrické uspořádání pravoúhlé mikropáskové antény.....	11
Obr. 2.2: Typy antén: a) rezonanční, b) štěrbinové, c) s postupnou vlnou [1].....	12
Obr. 2.3: Osový poměr u kruhové polarizace.....	13
Obr. 2.4: Dvoubodové ortogonální napájení	14
Obr. 2.5: Jednobodové napájení	14
Obr. 2.6: Amplituda a fáze ortogonálních módů u jednobodově napájené kruhově polarizované mikropáskové antény	15
Obr. 2.7: Napájení koaxiální sondou [1].....	16
Obr. 2.8: Napájení vazbou elektromagnetickým polem pomocí štěrbin [1]	16
Obr. 3.1: a) Oříznutá anténa (čtvercová) b) Oříznutá anténa (kruhová) c) Skoro čtvercová anténa	18
Obr. 3.2: Graf závislosti činitele jakosti a efektivity vyzařování na tloušťce substrátu	19
Obr. 3.3: Graf závislosti plochy antény na činiteli jakosti	19
Obr. 3.4: Návrh motivu mikropáskové antény.....	20
Obr. 3.5: a) Rozložení proudu s napájecím bodem v ose x , b) Rozložení proudu s napájecím bodem v ose y	21
Obr. 3.6: Vliv změny parametru B na průběh S_{11}	22
Obr. 3.7: Vliv změny parametru A na průběh S_{11}	22
Obr. 3.8: Vliv změny minima S_{11} na šířku pásma	23
Obr. 3.9: Průběh S_{11} pro substrát 25N	23
Obr. 3.10: Průběh S_{11} pro substrát FR4	24
Obr. 3.11: Průběh S_{11} pro substrát CuClad 217	24
Obr. 3.12: Náskres výsledné antény.....	25
Obr. 3.13: Model čtvercové antény z programu CST, a) pohled zepředu, b) pohled zezadu ...	25
Obr. 3.14: Směrové charakteristiky v polárních souřadnicích (CST).....	26
Obr. 3.15: Směrová charakteristika v 3D prostoru (CST)	26
Obr. 3.16: Směrová charakteristika v polárních souřadnicích (IE3D).....	27
Obr. 3.17: Průběh S_{11} pro substrát CuClad 217	27
Obr. 3.18: Návrh patche mikropáskové antény	28
Obr. 3.19: Průběh S_{11} pro substrát FR4	31
Obr. 3.20: Smitův diagram pro substrát FR4.....	32
Obr. 3.21: Směrová charakteristika v polárních souřadnicích pro substrát FR4 (IE3D)	32
Obr. 3.22: Směrové charakteristiky v polárních souřadnicích pro substrát FR4 (CST).....	33
Obr. 3.23: Směrová charakteristika v 3D zobrazení pro substrát FR4 (CST)	33
Obr. 3.24: Axiální poměr pro substrát FR4 (CST).....	34
Obr. 3.25: Vliv změny parametru A na průběh S_{11}	34
Obr. 3.26: Vliv změny parametru C na průběh S_{11}	35
Obr. 3.27: Průběh S_{11} pro substrát FR4	35
Obr. 3.28: Průběh S_{11} pro substrát FR4 v programu IE3D	36
Obr. 3.29: Smitův diagram pro substrát FR4.....	36
Obr. 3.30: Průběhy S_{11} pro substrát FR4	37
Obr. 3.31: Průběh S_{11} pro substrát CuClad 217	37
Obr. 3.32: Smitův diagram pro substrát Cuclad 217	38
Obr. 3.33: Průběh S_{11} pro substrát CuClad 217 v programu IE3D.....	38
Obr. 3.34: Směrová charakteristika v polárních souřadnicích pro substrát CuClad 217(IE3D)	39

Obr. 3.35: Směrové charakteristiky v polárních souřadnicích pro substrát CuClad 217(CST)	39
Obr. 3.36: Směrová charakteristika v 3D zobrazení pro substrát Cuclad 217 (CST).....	40
Obr. 3.37: Axiální poměr pro substrát Cuclad 217 (CST)	40
Obr. 3.38: Model skoro čtvercové antény z programu CST, a) pohled zepředu, b) pohled zezadu	41
Obr. 3.39: Průběhy S_{11} pro substrát CuClad 217	41
Obr. 4.1: Srovnání naměřených a simulovaných hodnot	43
Obr. 4.2: Výrobek (pohled zepředu)	44
Obr. 4.3: Výrobek (pohled zezadu).....	44
Obr. 4.4: Srovnání naměřených a simulovaných hodnot (FR4)	45
Obr. 4.5: Srovnání naměřených a simulovaných hodnot (CuClad)	46
Obr. 4.6: Srovnání naměřených a simulovaných hodnot (CuClad)	47
Obr. 4.7: Srovnání naměřených a simulovaných hodnot (Vzduch)	47
Obr. 4.8: Výrobky (pohled zepředu)	48
Obr. 4.9: Výrobky (pohled zezadu).....	48

Seznam tabulek

Tab. 3.1: Parametry jednotlivých substrátů	20
Tab. 3.2: Výsledky simulací pro jeden rezonanční kmitočet	42
Tab. 3.3: Výsledky simulací pro dva rezonanční kmitočty	42

1 Úvod

Mikropáskové antény jsou v dnešní době velice rozšířeným druhem antén. Začátek jejich vývoje spadá do poloviny minulého století. Už tehdy byla poptávka po výrobě plošných antén, a to zejména ve vojenské technice. Později byly rozšířeny i do civilní techniky, a to hlavně do oblasti komunikací. Například anténa navržená touto prací by měla být určena pro radiofrekvenční identifikaci (RFID).

Dnes již existuje celá řada různých provedení mikropáskových antén. Mohou se lišit tvarem (čtvercový, kruhový), polarizací (lineární, kruhová) a způsoby jak danou polarizaci vybudit. Velké rozdíly vznikají také v použitém substrátu, kterých je dnes celá řada. V neposlední řadě se liší způsobem napájení. To může být realizováno koaxiální sondou, mikropáskovým vedením nebo vazbou elektromagnetickým polem. Vlastnosti, výhody a nevýhody jednotlivých provedení budou v další části práce popsány podrobněji.

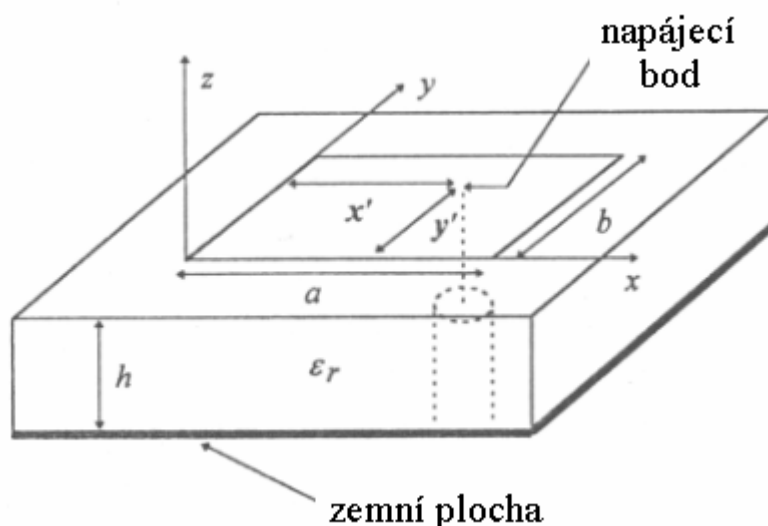
V bezdrátových komunikacích si velice často nevystačíme pouze s lineární polarizací. V případech, kdy neznáme přesně typ polarizace nebo neznáme vzájemnou polohu vysílače a přijímače, využíváme polarizaci kruhovou. Příkladem mohou být družicové spoje, satelitní navigace nebo mobilní komunikace. Při kruhové polarizaci koncový bod vektoru elektrické intenzity opisuje kružnici. Jedná se tedy o speciální případ eliptické polarizace, kdy je osový poměr roven jedné. V další části práce se budu podrobněji věnovat možnostem vzniku kruhově polarizované vlny.

Samotný návrh se zabývá planárním typem mikropáskové antény s kruhovou polarizací napájené v jednom bodě. Úkolem práce je i realizace zadání a následné srovnání výsledků měření se simulací.

2 Teoretická část

2.1 Mikropásková anténa

Tato anténa je tvořena kovovým páskovým vodičem upevněným na jedné straně tenké dielektrické desky, jejíž opačná strana je opatřena kovovou protiváhou. Anténní prvek se označuje „patch“ a je vytvořen fotochemickou technologií. Tvary mohou být různé. Stejně tak materiál dielektrika. Používají se substráty s malými ztrátami $\text{tg}\delta = 1 \cdot 10^{-4}$ až $1 \cdot 10^{-3}$ a relativní permitivitou $\epsilon_r = 2$ až 10. Většinou se navrhují v pásmu stovek MHz až desítek GHz. Použití nalézají v případech, kdy je obtížné předem zjistit polarizaci vysílací antény, např. u GPS, letadlové komunikace apod. Výhodou je konstrukční jednoduchost a cena, což je dáno zejména možností použít při napájení koaxiální sondu. Dalšími výhodami jsou především malé rozměry, nízká hmotnost, snadná výroba a kompatibilita s technologií mikrovlnných integrovaných struktur. K nevýhodám patří velká úzkopásmovost (menší než 1%), ztráty v substrátu, nižší zisk, vyzařování většinou do prostoru nad anténou a nízká výkonová zatížitelnost [1]. Mikropáskové antény zaznamenávají převážně v posledních letech výrazný nástup.

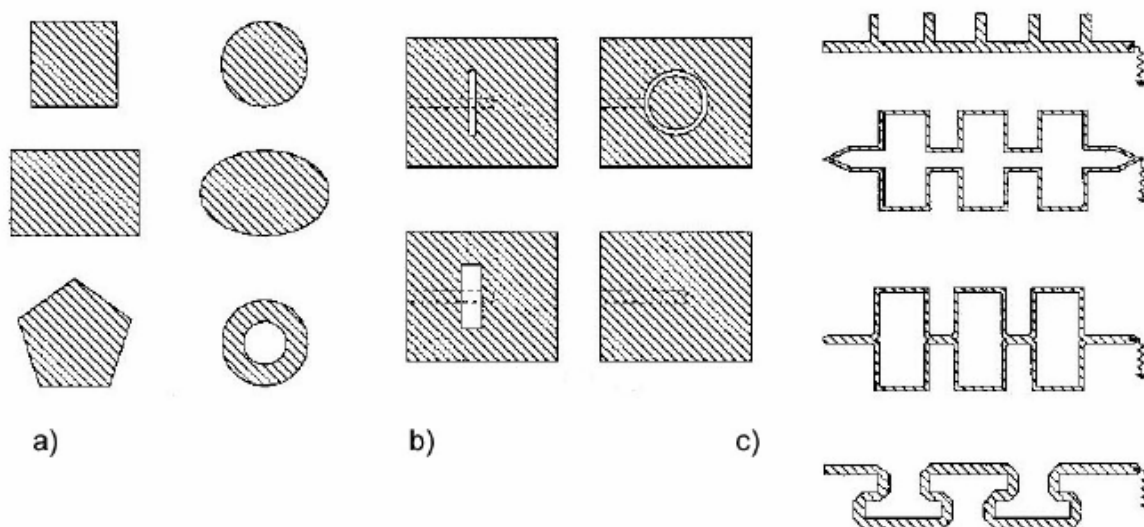


Obr. 2.1: Geometrické uspořádání pravoúhlé mikropáskové antény

Nejpoužívanějším vyzařovacím prvkem je jednovrstvá pravoúhlá struktura napájená koaxiální sondou (Obr. 2.1) nebo mikropáskovým vedením, která budí vlnění s lineární polarizací. Tento druh antén byl úspěšně navrhován za pomoci CAD systémů i bez nich. V praxi to znamená, že stačí vytvořit jeden až dva prototypy k dosažení požadované pracovní frekvence a vstupní impedance. Bohužel mnoho současných komunikačních a sensorových systémů vyžaduje jiný typ polarizace. Například GPS (Globální Poziční Systém) a soustavy s fázovým řízením (*phased arrays*) pro mobilní satelitní komunikaci pracují s kruhově polarizovanými mikropáskovými anténami [2].

2.2 Typy mikropáskových antén

Je používáno několik základních typů mikropáskových antén. Antény rezonanční, antény štěrbinové a antény s postupnou vlnou (viz obr. 2.2). Při jejich spojování dostaneme tzv. anténní řady nebo sloupcové sestavy.



Obr. 2.2: Typy antén: a) rezonanční, b) štěrbinové, c) s postupnou vlnou [1]

U prvního typu antén se podél některého rozměru antény rozloží elektromagnetické pole, které odpovídá určitému módu (podobné vlnodům). Drtivá většina antén se navrhuje jako „jednomódové“.

Štěrbínové antény jsou tvořeny pomocí štěrbin (délky $\lambda/2$) v zemní desce a vedení, které se nachází na druhé straně substrátu. Energie, která je přivedena vedením, vytváří tok proudu kolem štěrbin, který vytvoří elektromagnetické záření.

Poslední typ antén se skládá z půl-vlnných nebo čtvrt-vlnných rezonančních délek vedení. Jejich vzájemnou polohou a tvarem je možné ovlivnit směrové charakteristiky, jejich tvar, nebo směr maxima záření. Aby nedocházelo k odrazům energie na konci antény, musí být na svém konci zatížena přizpůsobenou impedancí.

2.3 Kruhová polarizace

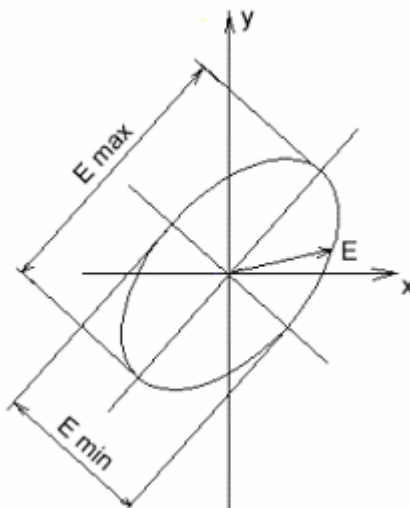
Kruhovou polarizaci využíváme v případech, kdy neznáme vzájemnou polohu vysílače a přijímače nebo neznáme přesně typ polarizace. Typickým příkladem jsou mobilní komunikace, u kterých musí mobilní stanice přijímat či vysílat v jakékoli poloze. Dalším příkladem jsou družicové spoje, kde družice rotuje kolem své osy. U družicových systémů je dalším důvodem tzv. Faradayův únik, proti kterému je kruhově polarizovaná vlna nejméně náchylná.

Obecně je každá polarizace eliptická. U takové polarizace je výsledná složka pole tvořena dvěma základními lineárními složkami. Vektor intenzity elektrické složky pole pak obíhá kolem osy ve směru šíření. U lineární polarizace existuje pouze jedna složka elektrického pole. V případě antény pracující s kruhovou polarizací musí současně excitovat oba ortogonální módy se stejnou amplitudou a se vzájemným fázovým posunem

$\pm 90^\circ$ [2], přičemž znaménko určuje smysl rotace. Existují prakticky jen dva způsoby uspořádání napájecího systému. Prvním způsobem je použití dvoubodového ortogonálního systému napájení (Obr. 2.4). Druhou možností je napájet zářič pouze v jednom bodě (Obr. 2.5).

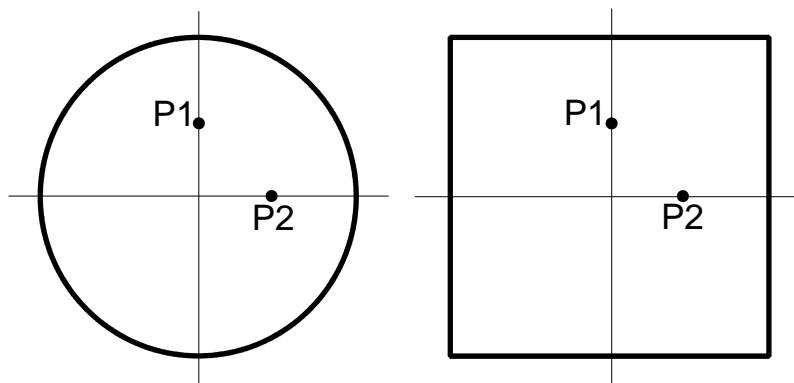
U lineární polarizace se dá orientace snadno určit ve dvou případech: horizontální a vertikální. U horizontální polarizace je složka elektrické intenzity pole rovnoběžná se zemským povrchem. U vertikální je k zemskému povrchu kolmá. V ostatních případech je určena úhlem náklonu mezi hlavní osou referenčním směrem. U eliptické polarizace se úhel náklonu určuje ve směru šíření elektromagnetické vlny. U kruhové polarizace žádný úhel náklonu nelze určit. Místo něj určujeme smysl otáčení, který je dán směrem otáčení vektoru intenzity elektrického pole.

Rozlišuje se pravotočivý smysl (po směru otáčení hodinových ručiček) a levotočivý (proti směru otáčení hodinových ručiček). Smysl otáčení se vztahuje vždy ke směru šíření vlny a platí jak u kruhové tak u eliptické polarizace. Kvalita kruhové polarizace se posuzuje axiálním (osovým) poměrem. Axiální poměr je dán podílem maximální a minimální intenzity elektrického pole (obr. 2.3). Pro kruhovou polarizaci je axiální poměr roven jedné, ale v praxi je možné takové hodnoty dosáhnout jen velice těžko.

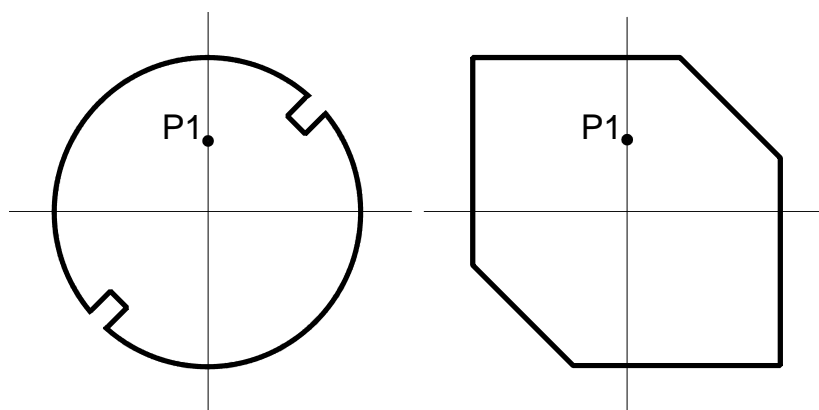


Obr. 2.3: *Osový poměr u kruhové polarizace*

$$AR = \frac{E_{\max}}{E_{\min}}$$



Obr. 2.4: Dvoubodové ortogonální napájení

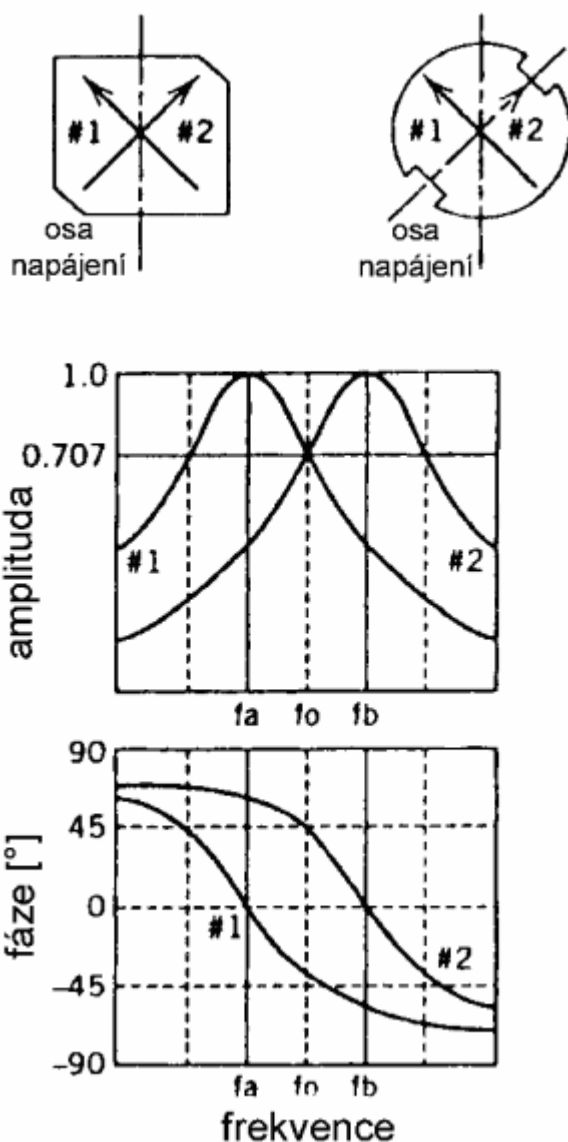


Obr. 2.5: Jednobodové napájení

Napájení antény ve dvou bodech je možné fyzicky realizovat řadou různých napájecích systémů. Úvahově nejjednodušší je použít k napájení antény dvou oddělených napáječů s relativním fázovým posunem proudů $\pm 90^\circ$ se stejnou amplitudou. Toto uspořádání vytváří dvě navzájem ortogonální lineárně polarizované vlny, které mají v čase kvadrurní fázi. Anténa může být napájena i jedním napáječem a potřebné kvadrurní buzení se získá pomocí zpožďovacího článku nebo pomocí rozdělovače signálu s nestejnou délkou napájecího vedení tak, aby bylo dosaženo požadovaného fázového posuvu. K tomuto účelu se úspěšně využívá několik děličů výkonu, např. kvadrurní hybrid, prstencový hybrid, Wilkinsonův výkonový dělič popř. T-článekový dělič.

Jednobodové napájení nalézá uplatnění ve chvíli, kdy není možné použít dvoubodové ortogonální napájení s děličem signálu. Stále je však i u tohoto napájení nutné dosáhnout vyzařování dvou navzájem degenerovaných ortogonálních módů se stejnou amplitudou. Toho nelze dosáhnout bez úpravy tvaru daného patche, a to tím způsobem, že plošku nepatrně narušíme na vhodném místě s ohledem na polohu napájení.

Různých tvarů a provedení je už dnes velké množství, ale všechny využívají stejný princip. Ten spočívá v rozladění základního rezonančního módu plošky na dva degenerované ortogonální módy se vzájemným posunem 90° na frekvenci f_0 tak, jak je zobrazeno na obrázku 4. Tím pádem oba módy splňují požadavek na podmínku kruhové polarizace, avšak pokud přeladíme frekvenci mimo f_0 , začne rapidně klesat osový poměr, přičemž impedanční přizpůsobení stále zůstává přijatelné.



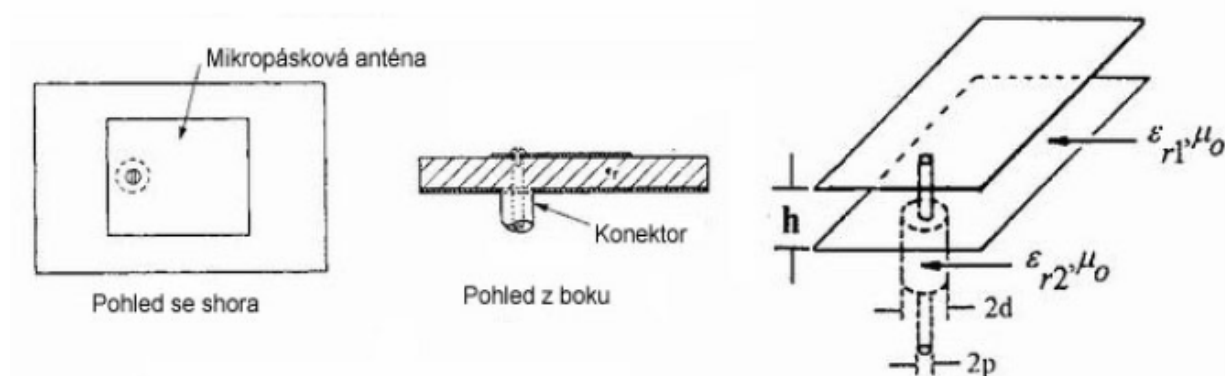
Obr. 2.6: Amplituda a fáze ortogonálních módů u jednobodově napájené kruhově polarizované mikropáskové antény

2.4 Způsoby napájení

U mikropáskových antén máme na výběr ze tří možností napájení: mikropáskovým vedením, koaxiální sondou nebo vazbou elektromagnetickým polem. V každém případě se způsobem napájení musíme počítat už při návrhu, protože se stává součástí antény.

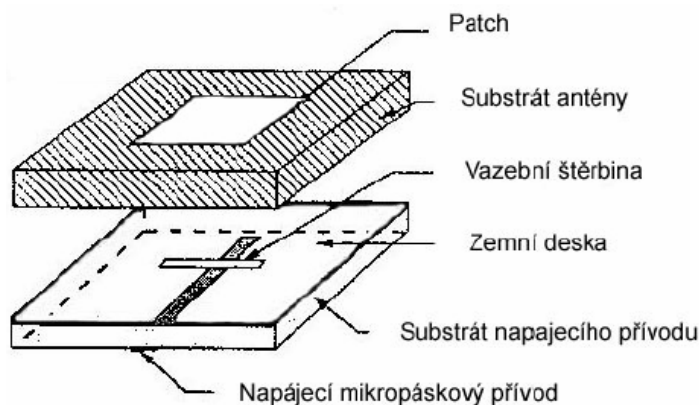
Ze tří uvedených možností je konstrukčně nejjednodušší mikropáskové vedení. To může být napojeno přímo na okraj patce nebo je zapuštěno hlouběji do něj. Druhý způsob nabízí možnost získat požadovanou impedanci. Další možností je vytvoření příčně zkratované štěrbinu a napájení je přivedeno na okraj flíčku. Vzájemnou vzdáleností místa napájení a štěrbinu je nastavena vstupní impedance. Největší výhodou napájení pomocí mikropáskového vedení je sdílení stejného substrátu, z kterého je vyrobena i anténa. Umožňuje spojení do řad.

Další možností, které je jistě složitější než předchozí varianta, je použití koaxiální sondy. Prakticky se jedná o protažení středního vodiče koaxiálního vedení skrz anténu do patche a zakončení stínícího vedení v zemní desce antény jak je znázorněno na Obr. 2.7. Je zde i vidět, že všechny napájecí přívody jsou skryty pod plochou antény a nijak neovlivňují její rozměry, což je jednoznačně výhoda. Nevýhodou je vznik vazby mezi napájecím přívodem a polem mezi deskami antény, protože ovlivňuje výslednou impedanci. Je však možné ji kompenzovat. Samotná vstupní impedance se definuje polohou napájení. Blíže ke středu patche impedance klesá, naopak k okraji se zvyšuje.



Obr. 2.7: Napájení koaxiální sondou [1]

Poslední možností je napájení pomocí vazby elektromagnetickým polem. Tento způsob napájení umožňuje galvanické oddělení napájecího obvodu od patche antény, zlepšuje impedanční přizpůsobení, zvyšuje šířku pásma. Provedení bývá různé. Jeden z nich je uveden na obr. 2.8, kde je použita vazební štěrbina, která je buzena primárním mikropáskovým přívodem.



Obr. 2.8: Napájení vazbou elektromagnetickým polem pomocí štěrbiny [1]

2.5 Substráty

Dnes máme k dispozici velké množství substrátů vyráběných z nevodivého a pevného dielektrického materiálu. Tyto substráty se dělí na pět základních skupin: polovodičové, syntetické, keramické, feromagnetické a kompozitní. U všech těchto skupin musíme uvažovat několik velice důležitých vlastností: dielektrická konstanta a ztrátový úhel a jejich závislost na teplotě a frekvenci, homogenita substrátu, teplotní roztažnost a rozsah pracovních teplot,

rozsah vlhkostí vzduchu, stárnutí materiálu, odolnost proti chemikáliím, pružnost, pevnost a opracovatelnost substrátu. Důležitou vlastností je i tloušťka dielektrika. Při jejím zvyšování roste velikost vyzářeného výkonu a šířka pásma antény. Nevýhodou je, že se zároveň zvyšuje i váha antény, ztráty v dielektriku a ztráty vlivem povrchových vln. Skoro stejným způsobem ovlivňuje vlastnosti antény i permitivita substrátu. Jen s tím rozdílem, že její pokles naopak zvyšuje vyzářený výkon. S rostoucí hodnotou ztrátového úhlu se zvyšují i ztráty v dielektriku.

Polovodičové substráty

Zde se používá zejména křemík a arsenid galia. Výhodou jsou malé rozměry a možnost integrace antén do mikrovlnných obvodů.

Syntetické substráty

K nejpoužívanějším patří teflon, polypropylen a polystyren. Syntetické substráty se vyznačují nízkými ztrátami a nízkou dielektrickou konstantou, jsou vhodné pro mikropáskové antény. Jejich nevýhoda spočívá v teplotní nestabilitě.

Keramické substráty

Zde je nejpoužívanější korund (Al_2O_3). Jedné se o tvrdý a křehký materiál, který se velice těžko obrábí. Výhodou keramických substrátů je vysoká hodnota relativní permitivity ϵ (16 až 150), což se používá k redukci rozměrů mikrovlnných obvodů na nízkých kmitočtech (pod 1 GHz).

Feromagnetické substráty

U těchto substrátů se díky vhodnému předmagnetizování dá dosáhnout velké šířky pásma (až 40%). Vhodným předmagnetizováním lze dosáhnout i kruhové polarizace. Stejně tak se dá měnit i relativní permitivita (9 až 16) a zároveň se příliš neovlivní směrové charakteristiky.

Kompozitní substráty

Jedná se o substráty vzniklé zkombinováním substrátů předešlých a přidáním skelných vláken. Snahou je vytvořit substrát, který spojuje ty nejlepší vlastnosti základních materiálů. Takto vzniklý substrát dosahuje hodnot ztrátového činitele 0,0005 až 0,002 a dielektrické konstanty 2,1 až 10 na frekvenci 10 GHz.

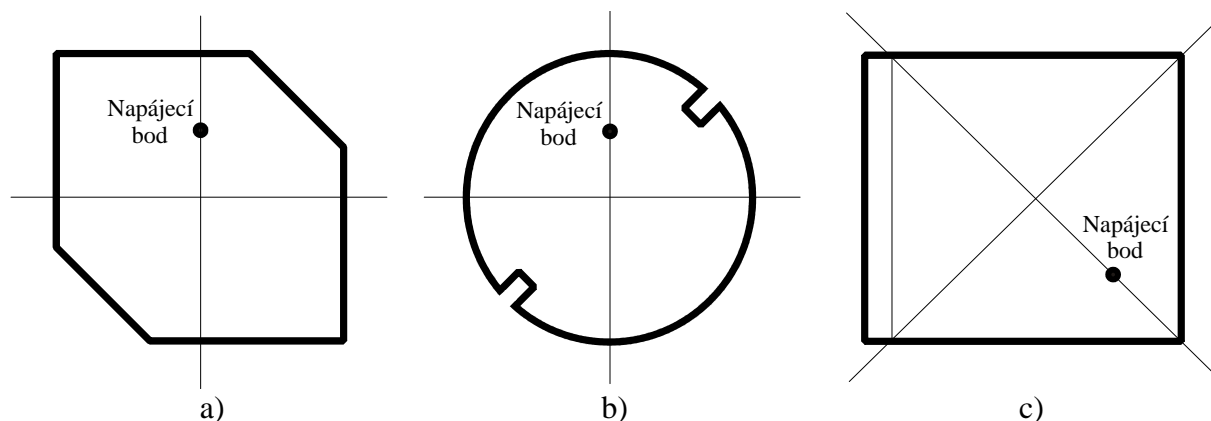
3 Návrh antény

Při návrhu jsem pracoval s napájením v jednom bodě. Antén, které takové napájení využívají, je celá řada. Na obr. 3.1 jsou uvedeny nejpoužívanější motivy. Jako první (a) je zde oříznutá anténa, jejímž základem je čtvercový motiv. Důležitou úpravu zde tvoří oříznutí protějších rohů na diagonále. Tím je způsoben fázový posuv amplitud o 90° , který je nutný pro vznik kruhově polarizované vlny (viz kapitola 2.3). Napájecí bod se nachází na ose jedné ze stran.

Další anténa (b) je velice podobná, jen s tím rozdílem, že její základní motiv je kruhový. Aby i zde byla splněna podmínka pro vznik kruhově polarizované vlny, musí osa, na které se nachází napájecí bod svírat úhel 45° s osou, na které se nacházejí rušivé elementy.

Jako poslední je zde uvedena skoro čtvercová anténa (c). Jejím základem je opět čtverec, který má jednu stranu prodlouženou o určitou délku (tzv. *extension*). Napájecí bod musí být na diagonále odpovídající hlavnímu rozměru antény.

U všech antén na obr. 3.1 je napájecí bod umístěn tak, že odpovídá pravotočivé polarizaci. Pro levotočivou polarizaci by musel být umístěn na druhé ose (diagonále).



Obr. 3.1: a) Oříznutá anténa (čtvercová) b) Oříznutá anténa (kruhová) c) Skoro čtvercová anténa

Délka neupravené čtvercové antény a zároveň průměr kruhové antény se vypočítá ze vztahu:

$$L = 0,49 \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

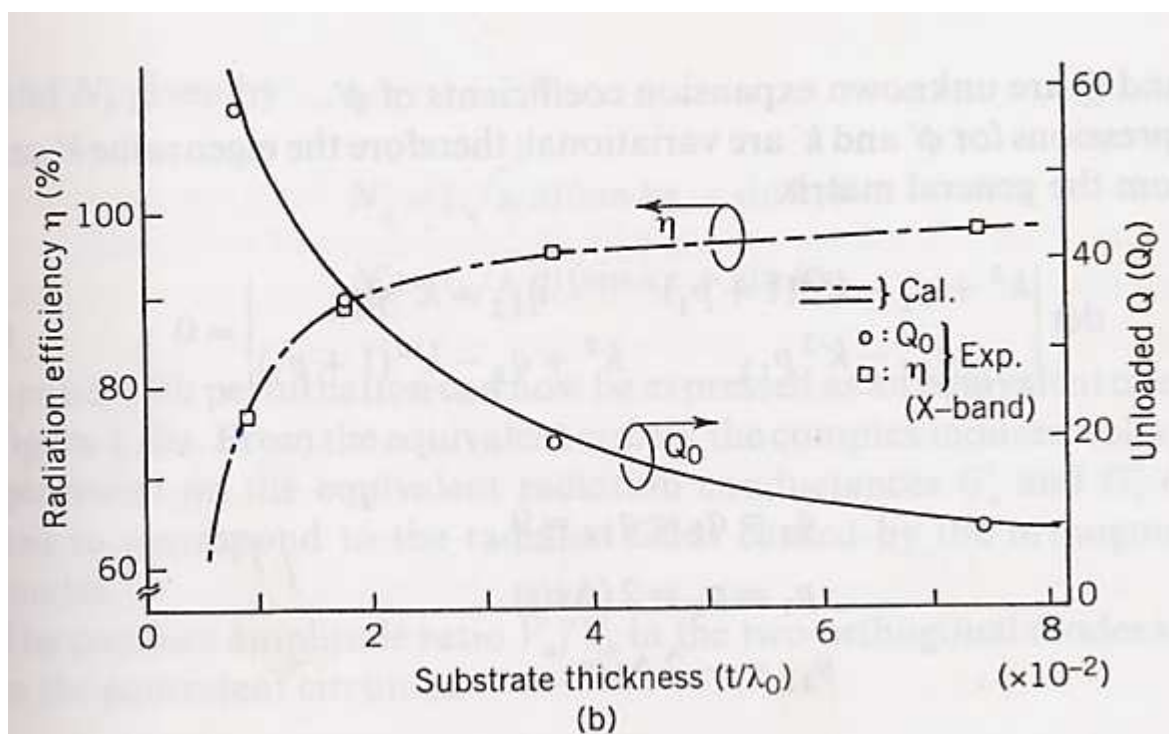
kde λ je vlnová délka, ϵ_r je relativní permitivita substrátu

U upravených antén můžeme vypočítat činitel jakosti:

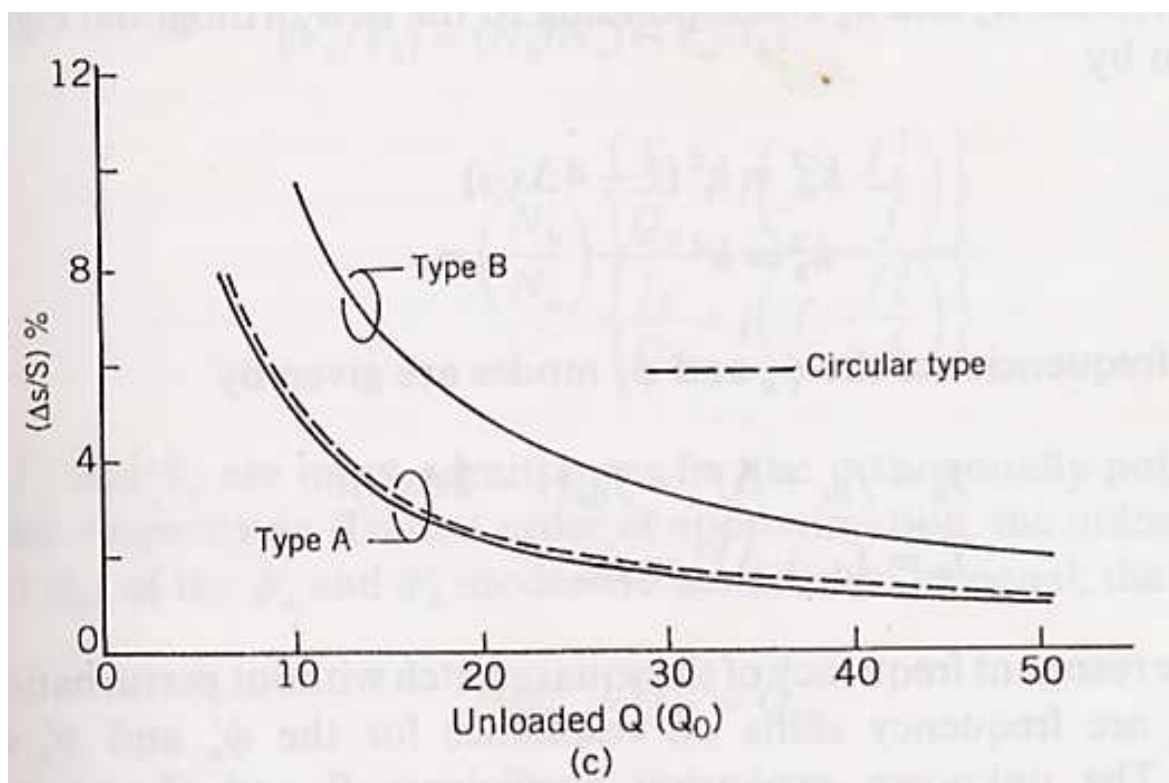
$$\frac{\Delta s}{S} = \frac{1}{Q} \quad (2)$$

kde Q je činitel jakosti, S je plocha antény, Δs je plocha odpovídající ořezané části antény (u ořezaných antén) nebo prodloužení (u skoro čtvercové antény)

Další možností, jak určit činitel jakosti, je odečíst jeho hodnotu z grafů uvedených na obr. 3.2 a obr. 3.3.



Obr. 3.2: Graf závislosti činitele jakosti a efektivity vyzařování na tloušťce substrátu



Obr. 3.3: Graf závislosti plochy antény na činiteli jakosti

Rezonanční kmitočet můžeme určit ze vztahu:

$$f = f' \left(1 - \frac{\Delta s}{S} \right) \quad (3)$$

kde f' je rezonanční kmitočet neupravené antény

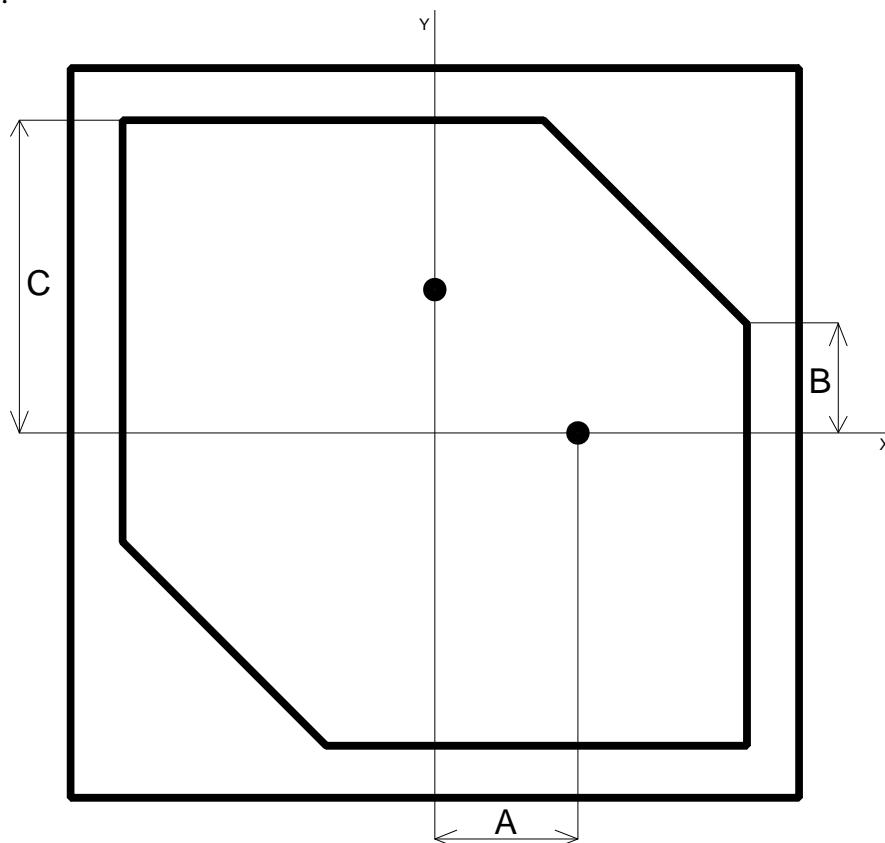
Pro vlastní návrh byly použity substráty CuClad 217, 25N a FR4, jejichž parametry jsou uvedeny v tab. 1. U některých motivů jsem se pokusil navrhnout a následně zhotovit i anténu se vzduchovým dielektrikem. Pracovní frekvence byla pro všechny návrhy stejná, a to 2,4 GHz. U každé antény jsem nejdříve provedl předběžný výpočet podle vztahů uvedených v této kapitole. Následovala simulace v programu CST Microwave Studio (dále jen CST). Jejím výsledkem byly nejen přesnější rozměry antén, ale také poloha napájecího bodu, která se velice obtížně vypočítává. Takto získané parametry jsem, pro srovnání, navíc simuloval v programu Zeland IE3D. Podle výsledků jsem nejlepší substrát vybral k výrobě.

	h [mm]	ϵ_r [-]	$\text{tg} \delta$ [-]
CuClad	1,57	2,17	0,003
25N	1,54	3,28	0,0025
FR4	1,50	4,20	0,03

Tab. 3.1: Parametry jednotlivých substrátů

3.1 Oříznutá anténa

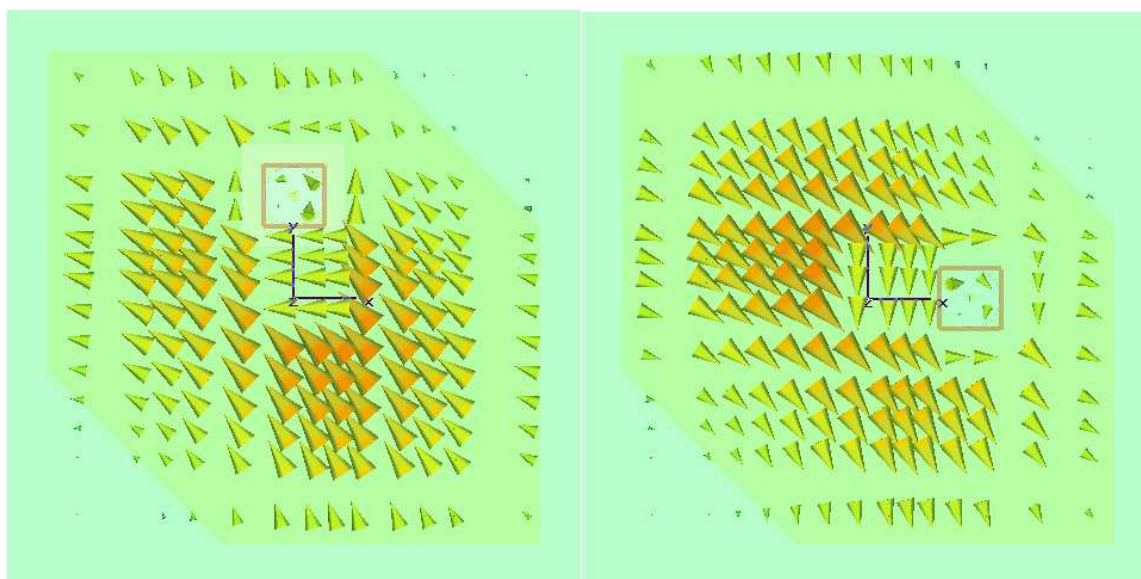
Jako první jsem navrhoval oříznutou anténu se čtvercovým motivem (dále jen čtvercovou).



Obr. 3.4: Návrh motivu mikropáskové antény

Na obr. 3.4 jsou vyznačeny rozměry, které bylo potřeba zjistit simulací. Je zde také vidět použití dvou napáječů, i když zvolený motiv odpovídá jednobodovému napájení. Jeden z portů je totiž použit pro vysílání a druhý pro příjem. Určitě by bylo možné použít pro obě funkce jediný port. Ne však v tomto případě, a to z následujícího důvodu.

Anténa bude využívána pro RFID technologii. Z toho vyplývá, že přijímaný signál je pouze odrazem od protější pasivní antény. To znamená, že při použití pravotočivé polarizace u vysílání dostaneme při příjmu vlnu s levotočivou polarizací. Takto přijatý signál je však značně utlumen (až o 30 dB), proto se vždy používají pro vysílání i příjem antény se stejnou kruhovou polarizací (obě jsou pravotočivé nebo obě levotočivé). Při použití jednoho napájecího bodu v ose x a druhého v ose y (oba se stejnou vzdáleností od středu) je tato podmínka splněna, protože se od sebe liší právě a jen opačnou kruhovou polarizací, což potvrzuje obr. 3.5, na kterém je vidět, že port umístěný v ose x odpovídá levotočivé kruhové polarizaci a port umístěný v ose y odpovídá pravotočivé kruhové polarizaci.



a)

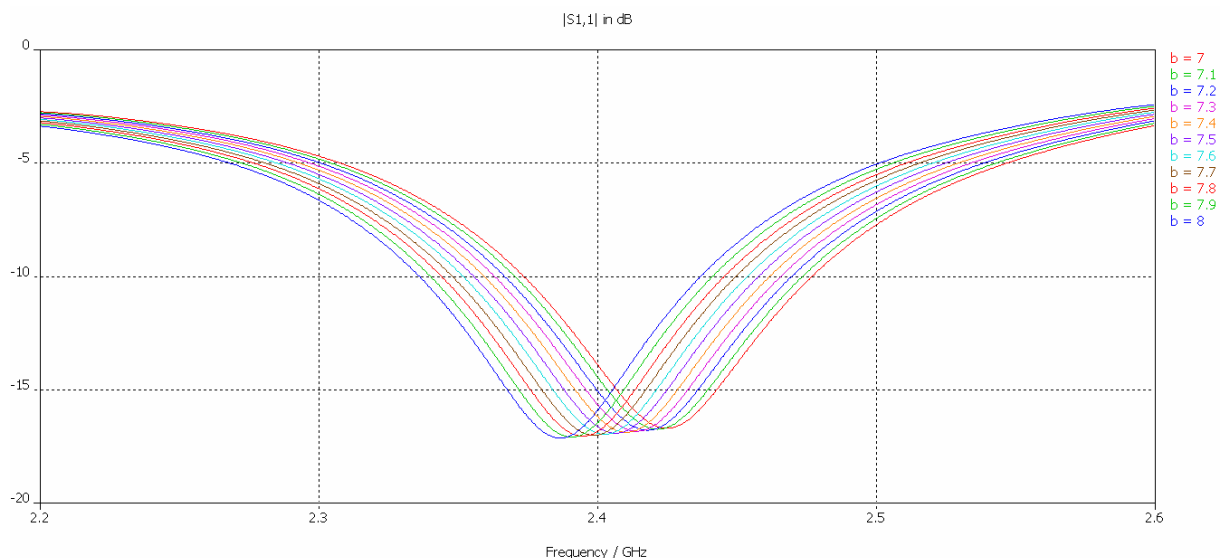
b)

Obr. 3.5: a) Rozložení proudu s napájecím bodem v ose x, b) Rozložení proudu s napájecím bodem v ose y

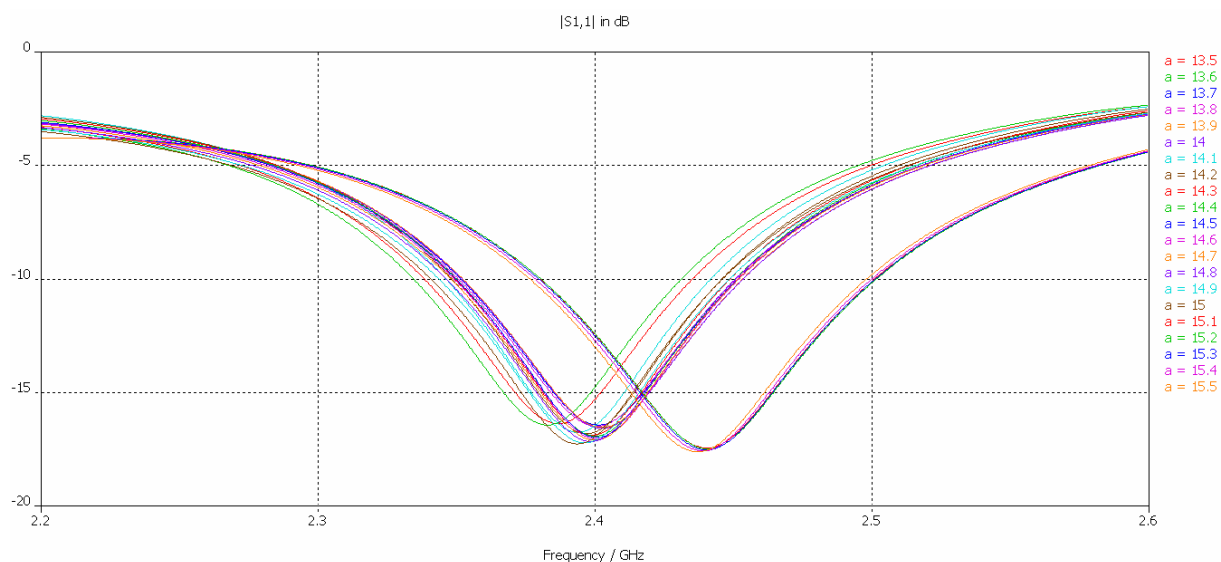
Hodnoty parametrů A, B a C (Obr. 3.4) jsem volil následujícím způsobem. Parametry B a C určují celkovou velikost patche, která je odvozena od frekvence pomocí vztahů (1), (2), (3) a obr. 3.2, obr. 3.3.

Velikost parametru A i případnou korekci B a C je možné určit následnou simulací, přičemž je potřebná znát, jak jednotlivé změny těchto parametrů změní výsledné průběhy. Obr. 3.6 ukazuje, jak se změní průběh S_{11} při změně parametru B. Je zde vidět, že se mění prakticky pouze frekvenční přizpůsobení antény, a to velice rovnoměrně. Tato změna je však výrazná. Při změně B o 1 mm se frekvence odpovídající minimu S_{11} změní přibližně o 30 MHz. Vliv změny parametru C je velice podobný. Oba parametry mají totiž vliv na celkovou velikost patche.

Se změnou parametru A (polohou napájecího bodu) je to však o něco komplikovanější. Na obr. 3.7 je vidět, že změna už není tak plynulá jako v předchozím případě. Hodnoty minima pro S_{11} i jemu odpovídající frekvence se mění skokově v závislosti na rovnoměrné změně polohy napájecího bodu, jehož vzdálenost od středu antény se mění od 13,5 do 15,5 mm po 0,1 mm. Tato vlastnost celý návrh velice komplikuje.



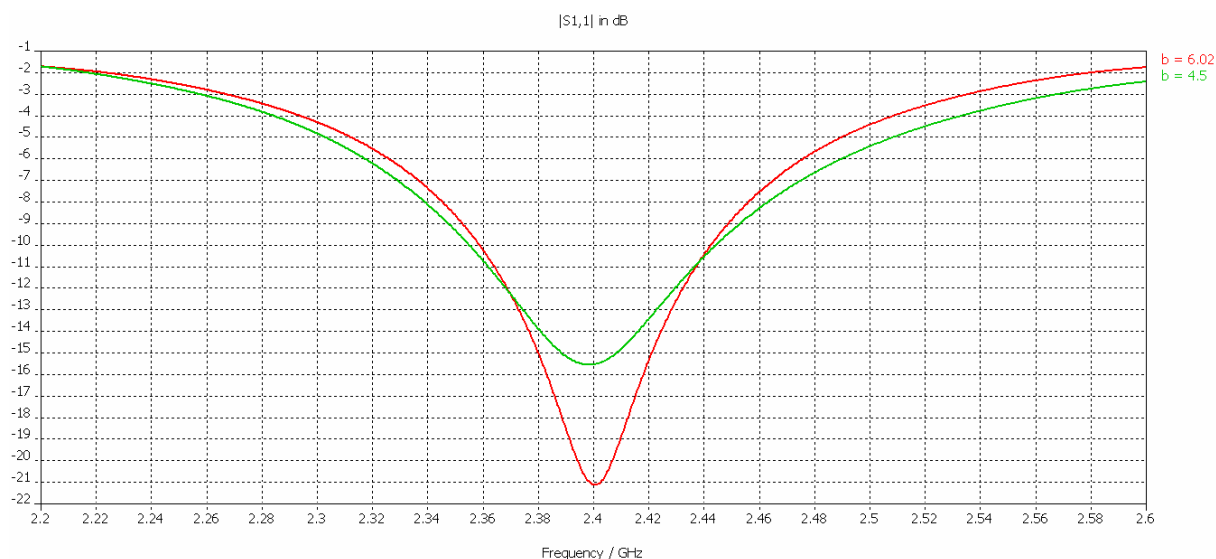
Obr. 3.6: Vliv změny parametru B na průběh S_{11}



Obr. 3.7: Vliv změny parametru A na průběh S_{11}

3.1.1 Vliv minimální hodnoty S_{11} na šířku pásma

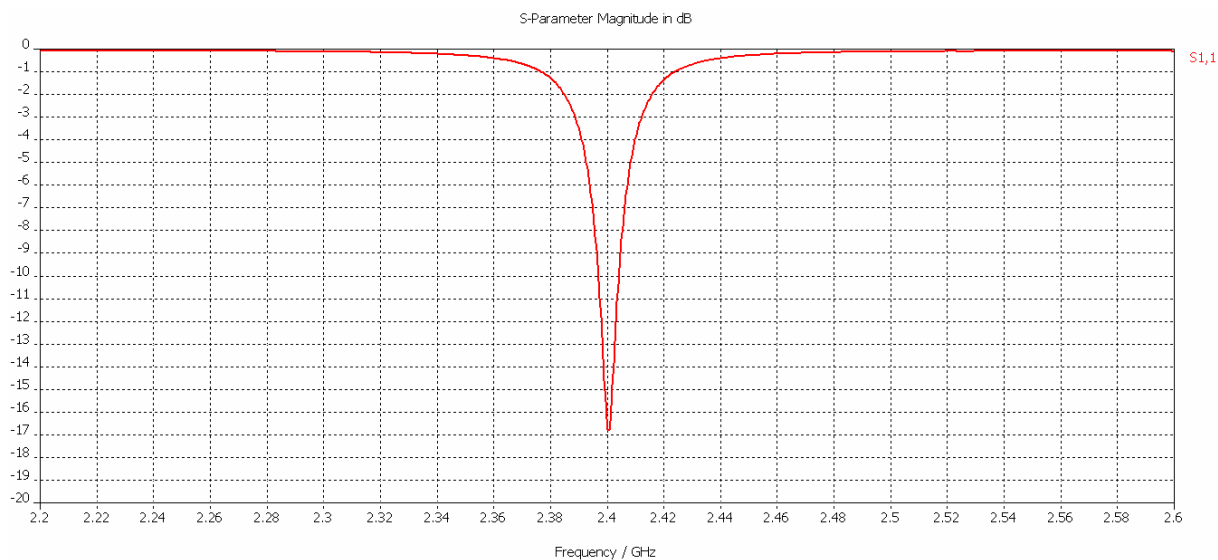
Snažil jsem se docílit co nejnižší hodnoty parametru S_{11} na frekvenci 2,4 GHz a zároveň co největší šířky pásma. Jak ukazuje obr. 3.8, tyto dva požadavky jsou zcela protichůdné. Při snižování hodnoty parametru S_{11} se zároveň zmenšuje i šířka pásma, a to celkem výrazně. Např. u substrátu Cuclad 217 platí, že při minimální hodnotě $S_{11} \sim -20$ dB je šířka pásma rovna přibližně 10 MHz, ale při $S_{11} \sim -35$ dB už je šířka pásma pětikrát menší. Navíc se při menších hodnotách S_{11} anténa hůře přizpůsobuje. Proto jsem jako kompromis zvolil minimální hodnotu parametru S_{11} , které jsem se snažil docílit, přibližně -20 dB.



Obr. 3.8: Vliv změny minima S_{11} na šířku pásma

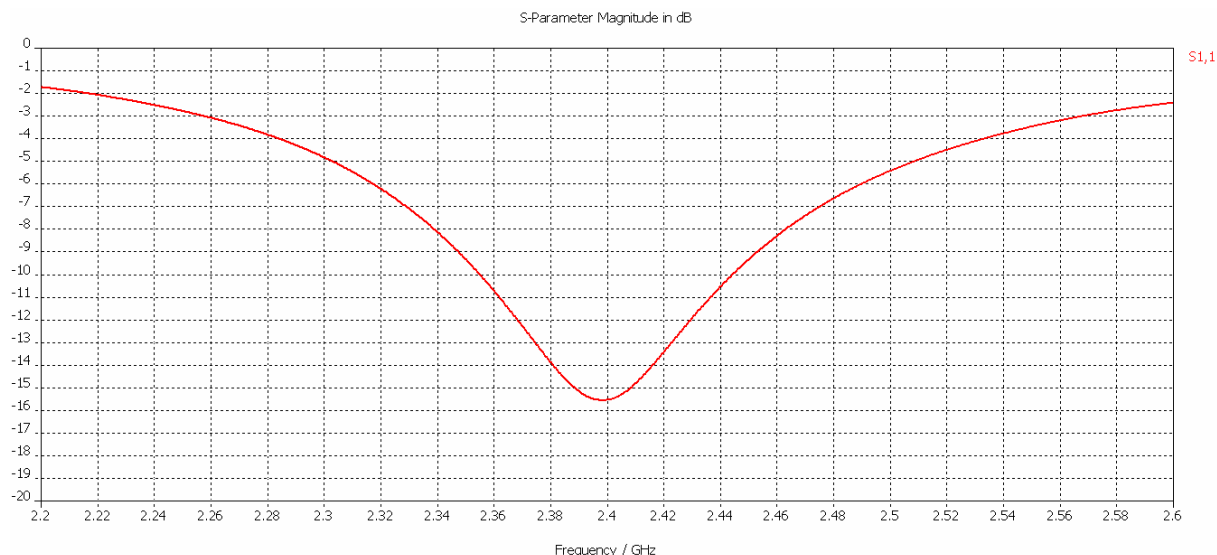
3.1.2 Volba substrátu

S přihlédnutím ke všem vlastnostem uvedeným v předchozích kapitolách jsem navrhoval anténu pro každý substrát. Na obr. 3.9 je průběh S_{11} substrátu 25N. Na první pohled je vidět, že anténa s tímto substrátem je velice úzkopásmová, což je důvod, proč jsem se pro výrobu antény z tohoto substrátu nerozhodl.



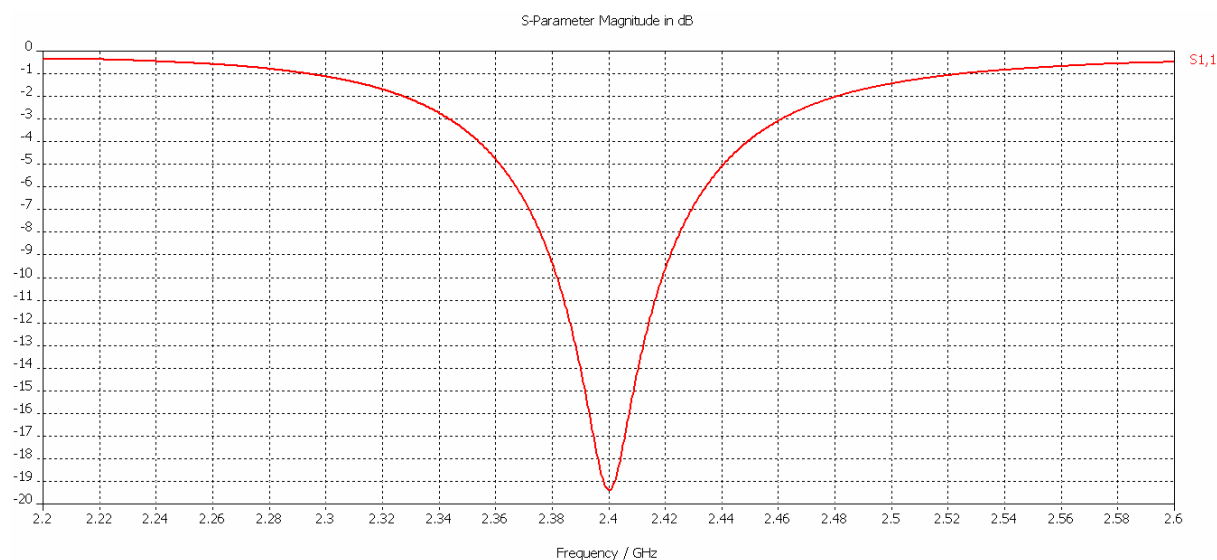
Obr. 3.9: Průběh S_{11} pro substrát 25N

Na dalším obrázku je průběh S_{11} substrátu FR4. Zde už je šířka pásma vyhovující, ale ani pro tento substrát jsem se nerozhodl. Důvodem bylo nesnadné frekvenční přizpůsobení. Anténa při návrhu vyžadovala vysokou přesnost, které bych při výrobě nebyl schopen docílit.



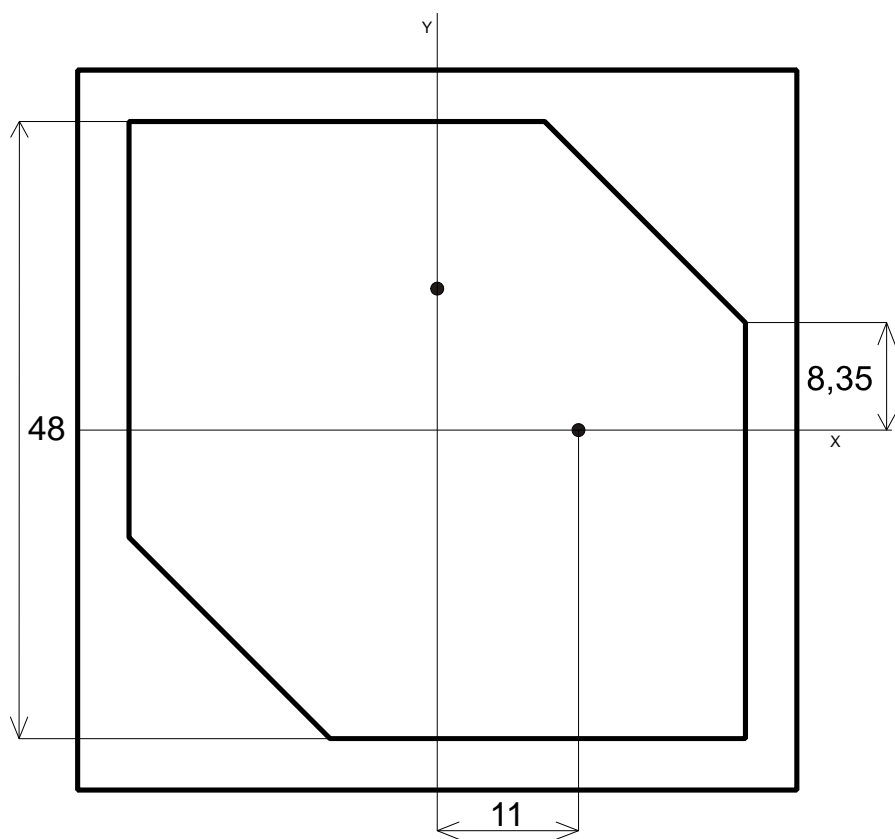
Obr. 3.10: *Průběh S_{11} pro substrát FR4*

Obr. 3.11 ukazuje průběh S_{11} substrátu CuClad 217. Anténa s tímto substrátem má menší šířku pásma než anténa předešlá, ale je stále ještě dostačující. Důležité také je, že tato anténa se dobře frekvenčně přizpůsobovala a při návrhu vyžadovala přesnost maximálně na setiny milimetru, a proto jsem k výrobě vybral tento substrát.

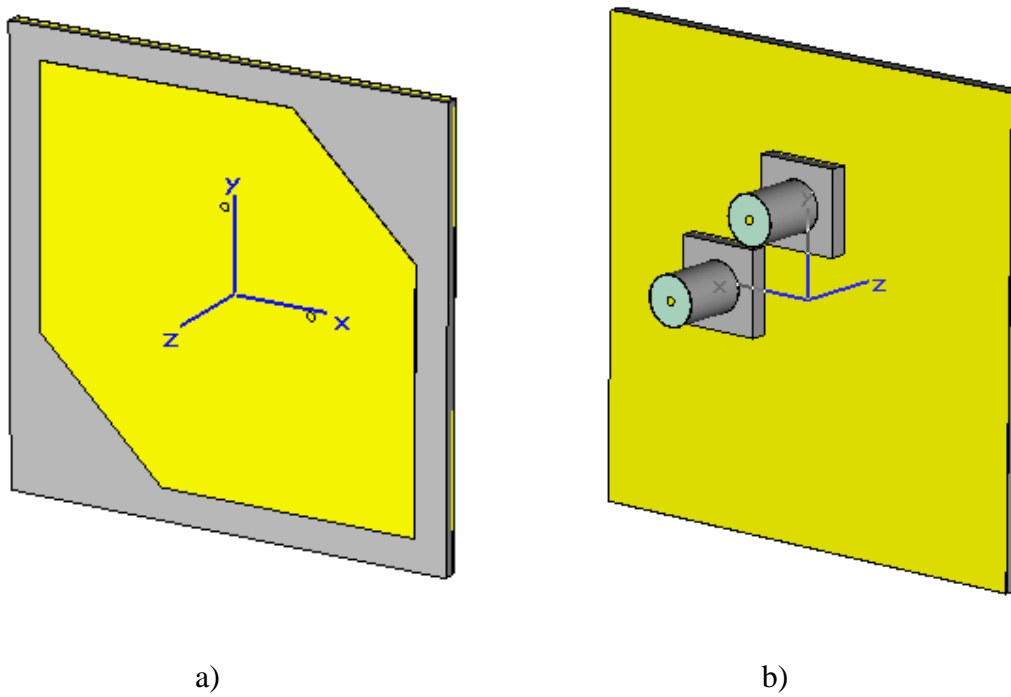


Obr. 3.11: *Průběh S_{11} pro substrát CuClad 217*

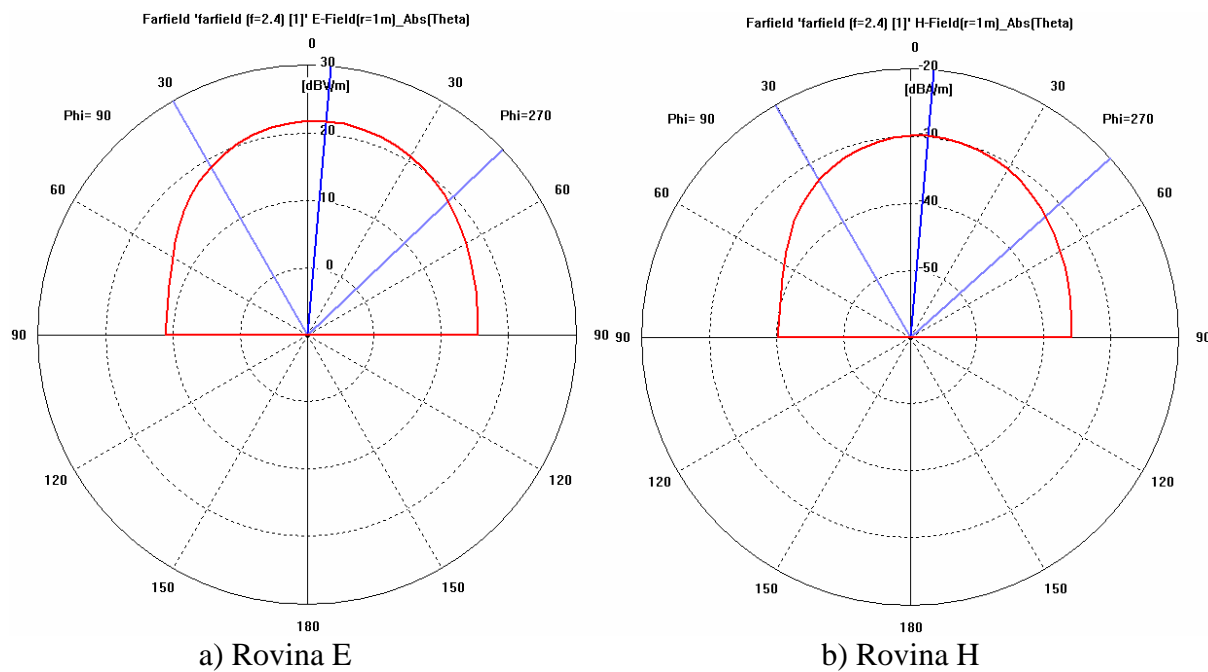
Výsledný návrh antény získaný pomocí programu CST je znázorněn na obr. 3.13. Jak je vidět na pohledu zezadu, zahrnul jsem do nákresu i oba konektory pro koaxiální kabely. Tím je dosaženo vyšší přesnosti získaných výstupů z takto simulované antény. Na dalším obrázku je nákres výsledné antény s hodnotami rozměrů v milimetrech.



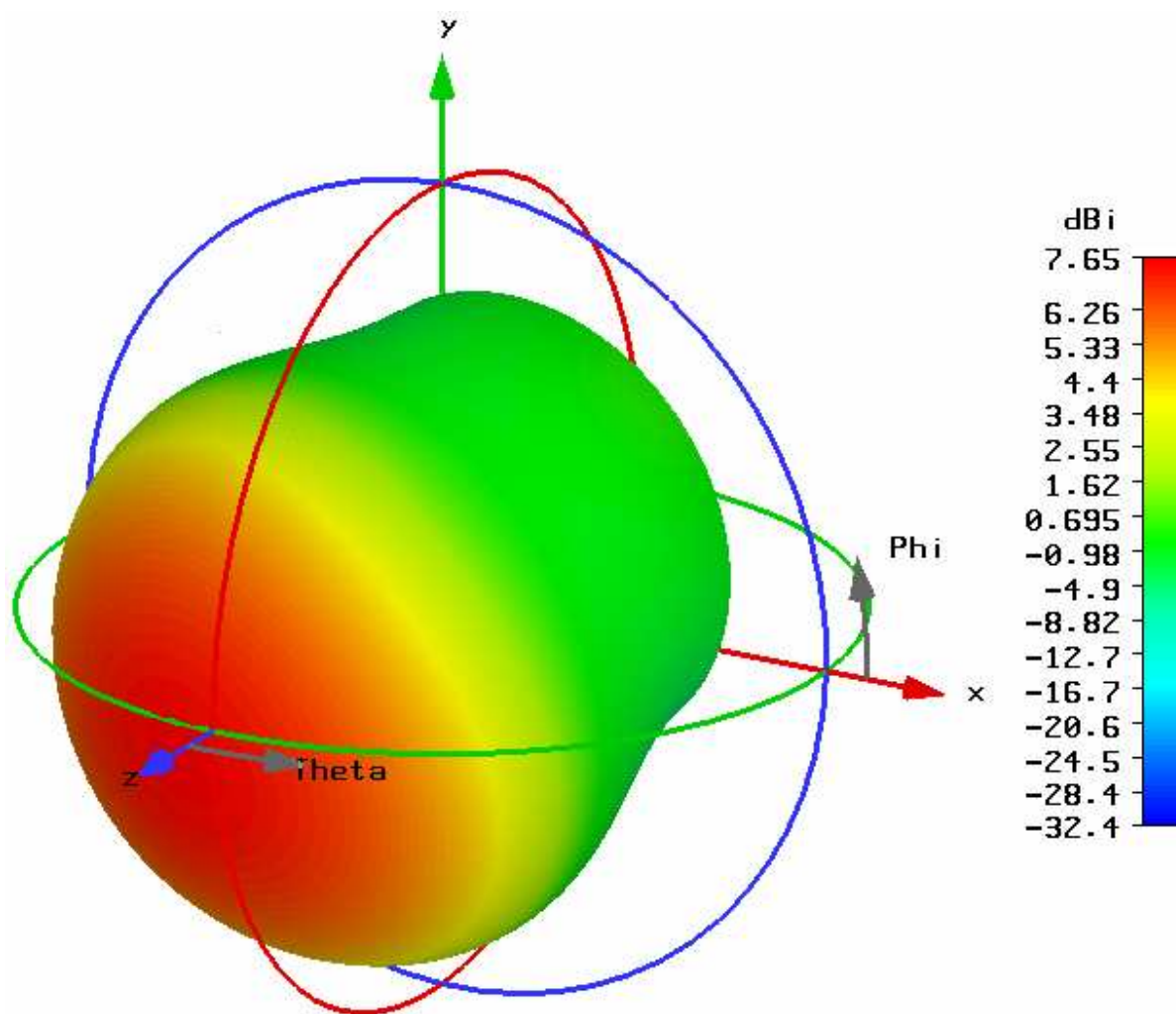
Obr. 3.12: *Nákres výsledné antény*



Obr. 3.13: *Model čtvercové antény z programu CST, a) pohled zepředu, b) pohled zezadu*



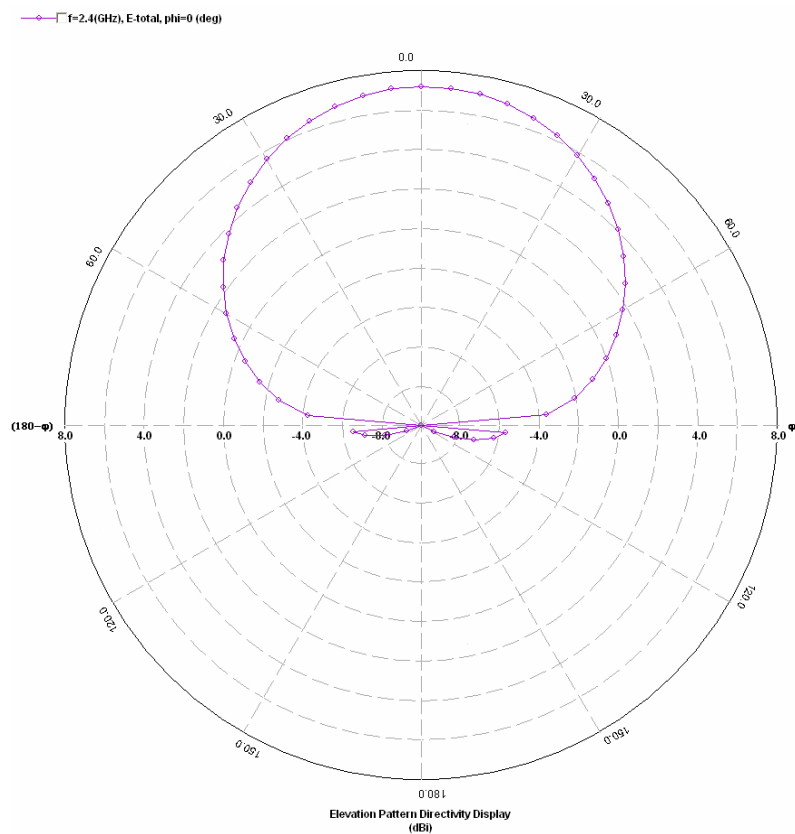
Obr. 3.14: Směrové charakteristiky v polárních souřadnicích (CST)



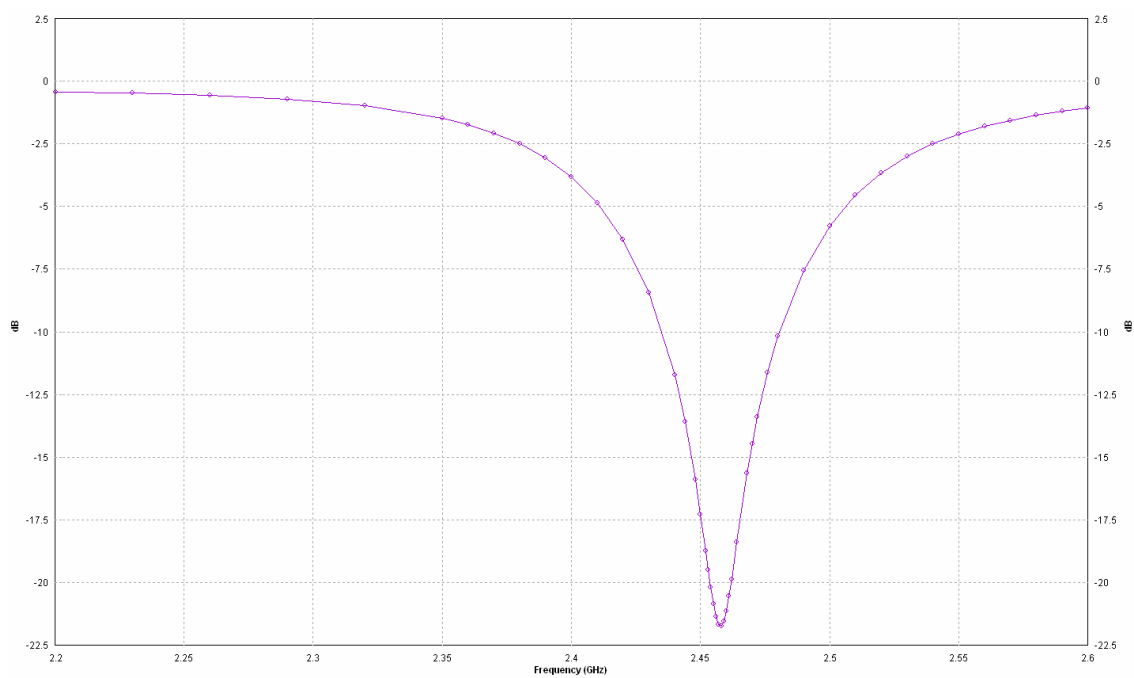
Obr. 3.15: Směrová charakteristika v 3D prostoru (CST)

3.1.3 Simulace v programu IE3D

Pro srovnání jsem anténu simuloval také v programu IE3D. Parametry antény jsem zadal stejné jako u programu CST.



Obr. 3.16: Směrová charakteristika v polárních souřadnicích (IE3D)



Obr. 3.17: Průběh S_{11} pro substrát CuClad 217

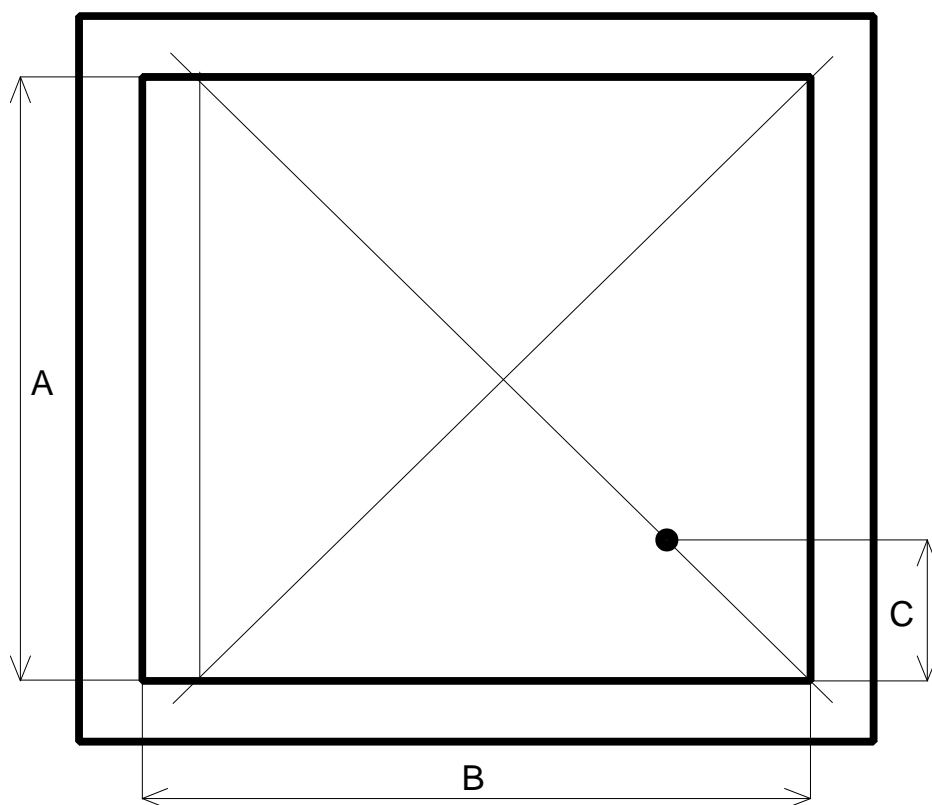
Při srovnání obr. 3.11 a 3.17 je vidět, že výsledné průběhy simulací jsou různé. Rozdíl je nejspíše způsoben tím, že u programu CST jsou v nákresu zahrnuty i konektory pro koaxiální kabely. Ty do nákresu v programu IE3D nebylo možné zahrnout. To je také důvod, proč byla anténa vyrobena podle hodnot z programu CST. Výsledky měření a jejich srovnání se simulacemi je uvedeno v kapitole 3.

3.1.4 Kruhový motiv

U antény s kruhovým motivem jsem postupoval naprosto stejně jako u antény se čtvercovým motivem. Tomu odpovídaly i výsledky simulací, které byly velice podobné. To je zároveň důvod, proč jsem se touto anténou dále nezabýval. Rozdílných a také lepších výsledků jsem dosahoval u antény se skoro čtvercovým motivem. Její návrh je popsán v kapitole 3.2.

3.2 Skoro čtvercová anténa

Na obr. 3.18 jsou vyznačeny rozměry, které bylo potřeba zjistit simulací. Při návrhu antény se skoro čtvercovým motivem jsem zvolil odlišný postup. Výpočet pomocí vztahů (1) až (3) zůstal zachován. Navíc jsem provedl návrh pomocí programu CPPATCH. Postup je uveden v kapitole 3.2.1. Následné simulace už probíhaly jiným způsobem. Po zkušenostech s velice rozdílnými výsledky z programů CST a IE3D při návrhu oříznutých antén jsem nyní v programu CST nejprve provedl simulaci s diskretním portem, tak jako u programu IE3D, kde ani jiná možnost není. Při správném návrhu jsem tak dostal velice srovnatelné výsledky. Až poté jsem do návrhu v programu CST dokreslil SMA port, který jsem budil jako vlnovod.



Obr. 3.18: Návrh patche mikropáskové antény

3.2.1 Návrh pomocí programu CPPATCH

Při návrhu mikropáskových antén je také možné využít software, který je přiložen na disketě k literatuře [4]. Z balíku programů jsem pro návrh antény s kruhovou polarizací použil CPPATCH. EXE (76342 Bytů), který k výpočtu využívá vzorců uvedených v kapitole 3.

V následujícím popisu uvádím hlášení, která program postupně vypisuje při svém běhu na obrazovku monitoru. Velkými písmeny je napsán text, který generuje program. Tučným písmem jsou napsány údaje zadané uživatelem a kurzívou je napsán komentář. Výpočet jsem provedl pro substráty FR4 a CuClad 217.

Návrh antény ze substrát FR4:

1. DO NEARLY SQUARE (N) OR TRUNCATED (T) PATCH DESIGN? **N**
Chcete navrhnout skoro čtvercovou (n) nebo ořezanou (t) anténu?
2. RIGHT (R) OR LEFT (L) CIRCULAR POLARIZATION? **R**
Navrhnout anténu s pravou nebo levou polarizací?
3. INPUT ANTENNA FREQUENCY (GHz)? **2.4**
Vlož frekvenci pro návrh antény
4. SUBSTRATE RELATIVE DIELECTRIC CONSTANT AND LOSS TANGENT?
4.12,0.03
Vlož relativní dielektrickou konstantu mikropáskového substrátu a jeho ztrátový činitel
5. INPUT SUBSTRATE HEIGHT (CM)? **0.15**
Vlož šířku substrátu mikropáskového v centimetrech
6. INPUT CONDUCTOR CONDUCTIVITY RELATIVE TO COPPER DEFAULT VALUE IS 1)? **1**
Vlož relativní konduktivitu mědi mikropáskového vedení, obvykle =1
7. INPUT FEED INSET (CM) ALONG DIAGONAL
[0<=YF< 4.6534]
[PATCH CENTER PATCH EDGE]? **1.344**
Vložte vzdálenost napáječe po diagonále od rohu antény v cm
8. INCLUDE FEED PROBE (y or n)? **Y**
Použít napájení koaxiálním kabelem, jinak lze pomocí mikropáskového vedení?
9. INPUT FEED PROBE DIAMETER (CM)? **0.13**
Zadej vnitřní průměr koaxiálního kabelu v cm
10. INPUT FEED PROBE RELIEF HOLE DIAMETER (CM)? **0.43**
Zadej vnější průměr koaxiálního kabelu v cm

11. INPUT START AND STOP FREQUENCIES (GHz)? **2.2,2.6**
Zadej počáteční a konečnou hodnotu frekvence, pro kterou se bude počítat impedance antény
12. INPUT NUMBER OF FREQUENCIES TO CALCULATE IMPEDANCE? **20**
Zadej počet frekvencí, pro které se budou počítat impedance antény

Program vygeneruje následující údaje:

SUBSTRATE HEIGHT = 0.1500 CM
 SUBSTRATE RELATIVE DIELECTRIC CONSTANT = 4.20
 SUBSTRATE LOSS TANGENT = 0.0300
 CONDUCTOR RELATIVE CONDUCTIVITY = 1.000
 NOMINAL PATCH SIZE = 2.9942 CM
 Základní rozměr antény
 FEED LOCATION = 1.0153 (CM), -0.9504 (CM)
 Umístění napáječe na anténě
 WIDTH EXTENSION = 0.12994 (CM)
 Prodloužení větší strany
 FEED PROBE DIAMETER = 0.1300 cm
 FEED PROBE RELIEF HOLE DIA. = 0.4300 CM
 CP FREQUENCY = 2.3458 Ghz
 Rezonanční kmitočet antény

Návrh antény ze substrát CuClad 217:

Při návrh byly všechny hodnoty stejné jako v předchozím případě až na hodnoty relativní permitivity, ztrátového činitele, šířky použitého substrátu a vzdálenosti napáječe po diagonále.

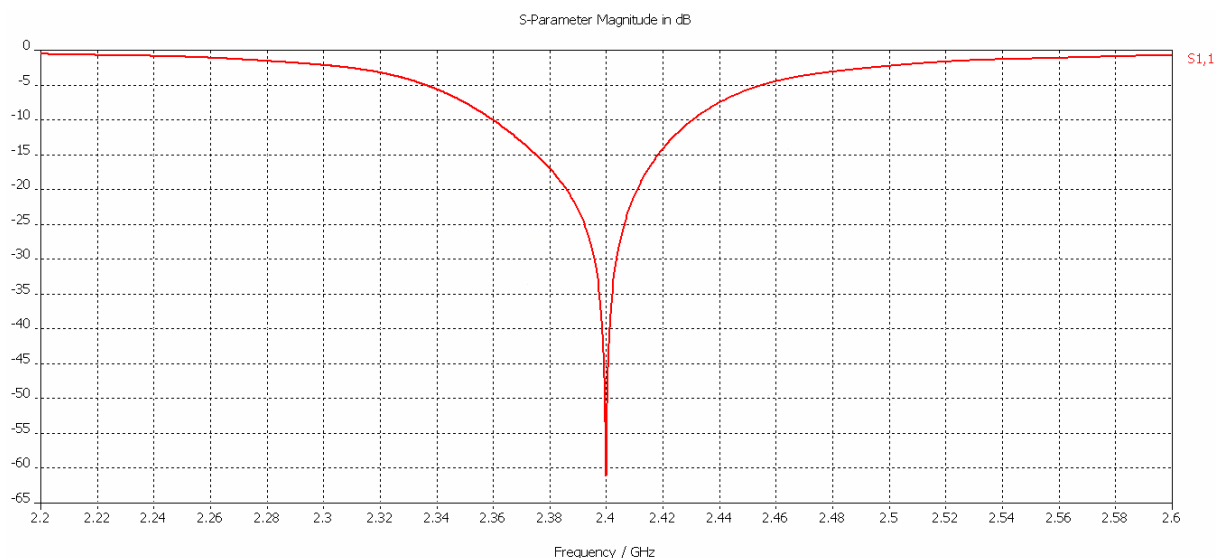
4. SUBSTRATE RELATIVE DIELECTRIC CONSTANT AND LOSS TANGENT?
2.33,0.0009
Vlož relativní dielektrickou konstantu mikropáskového substrátu a jeho ztrátový činitel
5. INPUT SUBSTRATE HEIGHT (CM)? **0.154**
Vlož šířku substrátu mikropáskového v centimetrech
7. INPUT FEED INSET (CM) ALONG DIAGONAL
[0<=YF< 4.6534]
[PATCH CENTER PATCH EDGE]? **2.036**
Vložte vzdálenost napáječe po diagonále od rohu antény v cm

Program vygeneruje následující údaje:

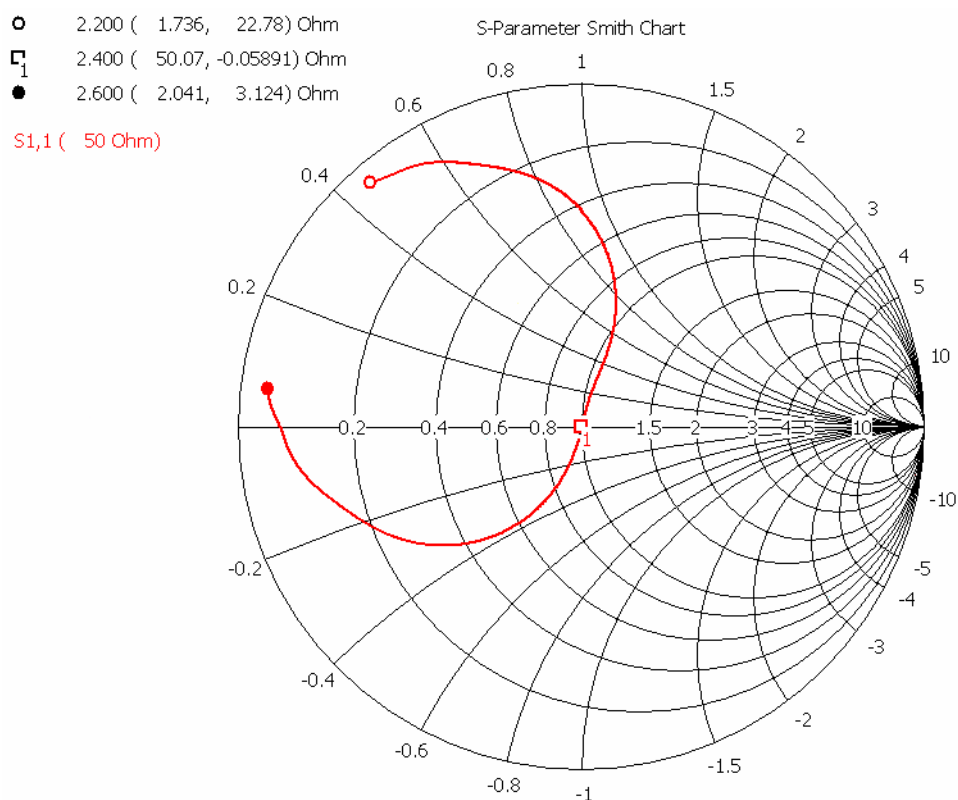
SUBSTRATE HEIGHT = 0.1540 CM
SUBSTRATE RELATIVE DIELECTRIC CONSTANT = 2.33
SUBSTRATE LOSS TANGENT = 0.0009
CONDUCTOR RELATIVE CONDUCTIVITY = 1.000
NOMINAL PATCH SIZE = 3.9472 CM
Základní rozměr antény
FEED LOCATION = 1.4805 (CM), -1.4397 (CM)
Umístění napáječe na anténě
WIDTH EXTENSION = 0.08159 (CM)
Prodloužení větší strany
FEED PROBE DIAMETER = 0.1300 cm
FEED PROBE RELIEF HOLE DIA. = 0.4300 CM
CP FREQUENCY = 2.3750 Ghz
Rezonanční kmitočet antény

3.2.2 Jeden rezonanční kmitočet

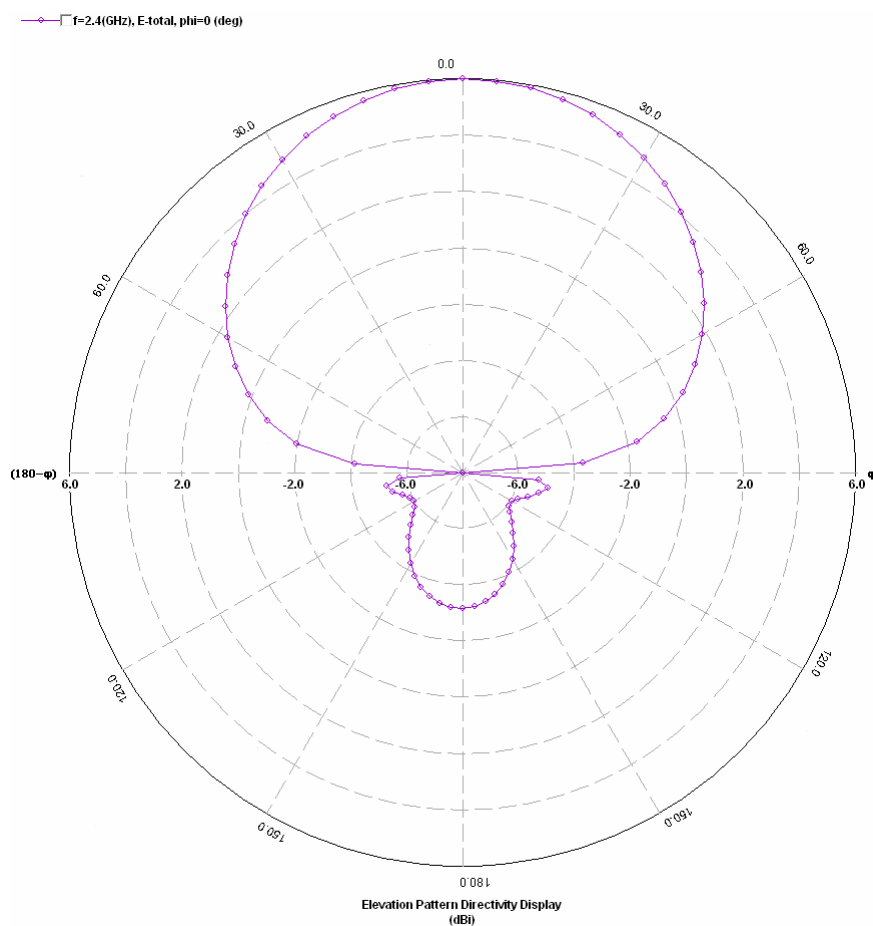
Při návrhu s diskretním portem jsem se snažil u každého substrátu docílit co nejlepšího výsledku. Jako je to vidět na obr. 3.19. Navíc je ve Smithově diagramu vidět (obr. 3.20), že anténa je takřka přesně přizpůsobena na impedanci 50Ω . Z toho vyplývají i velice povedené směrové charakteristiky (obr. 3.21 a 3.22) i axiální poměr (obr. 3.23).



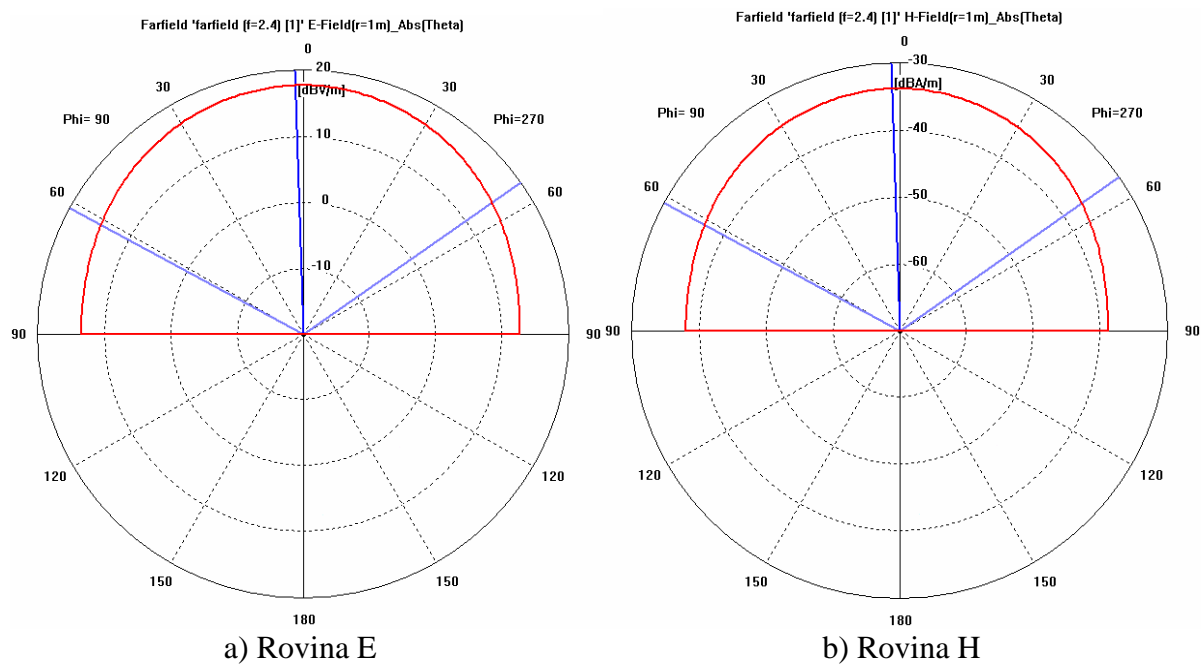
Obr. 3.19: Průběh S_{11} pro substrát FR4



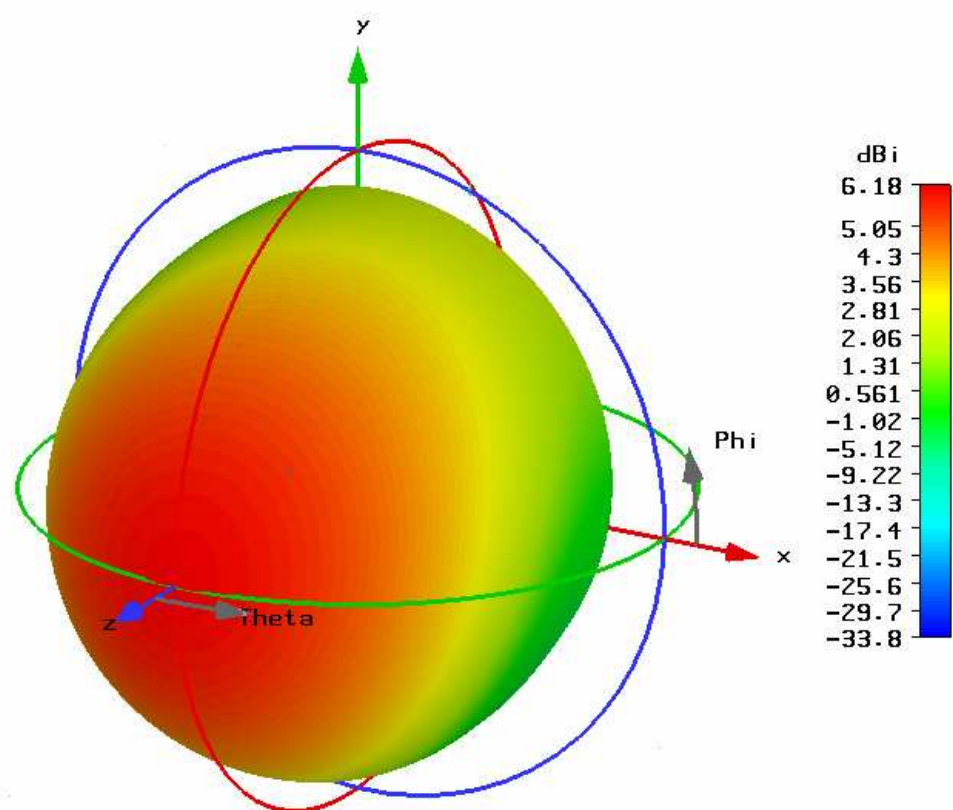
Obr. 3.20: Smitův diagram pro substrát FR4



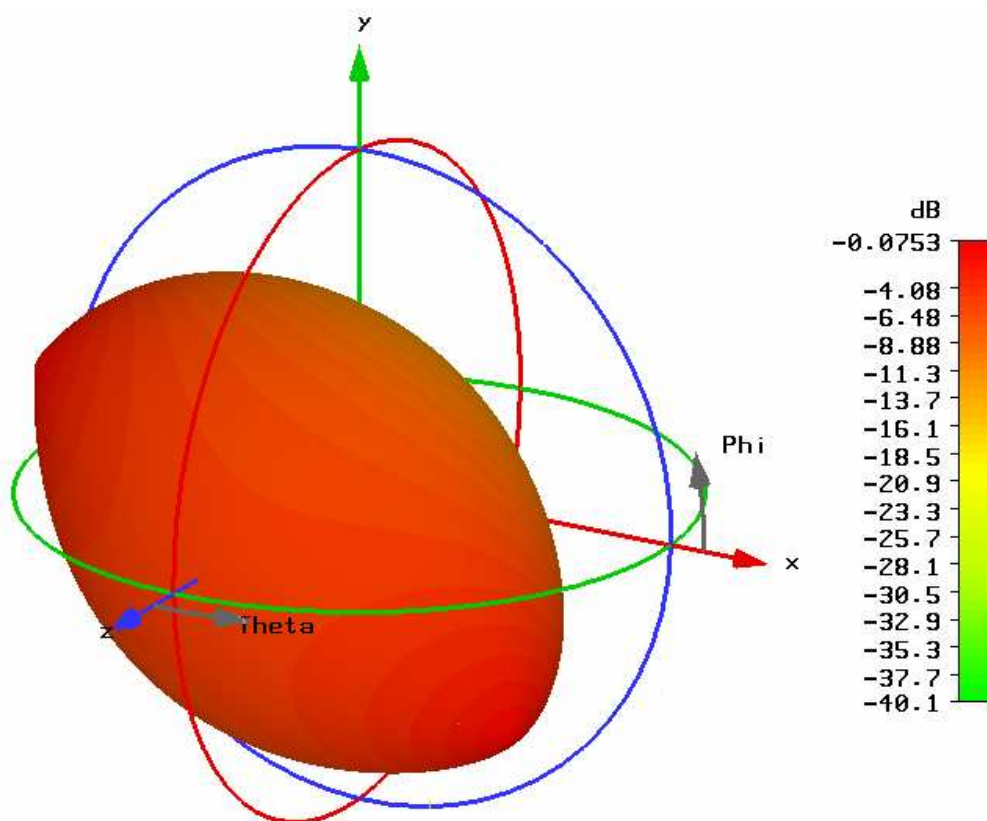
Obr. 3.21: Směrová charakteristika v polárních souřadnicích pro substrát FR4 (IE3D)



Obr. 3.22: Směrové charakteristiky v polárních souřadnicích pro substrát FR4 (CST)

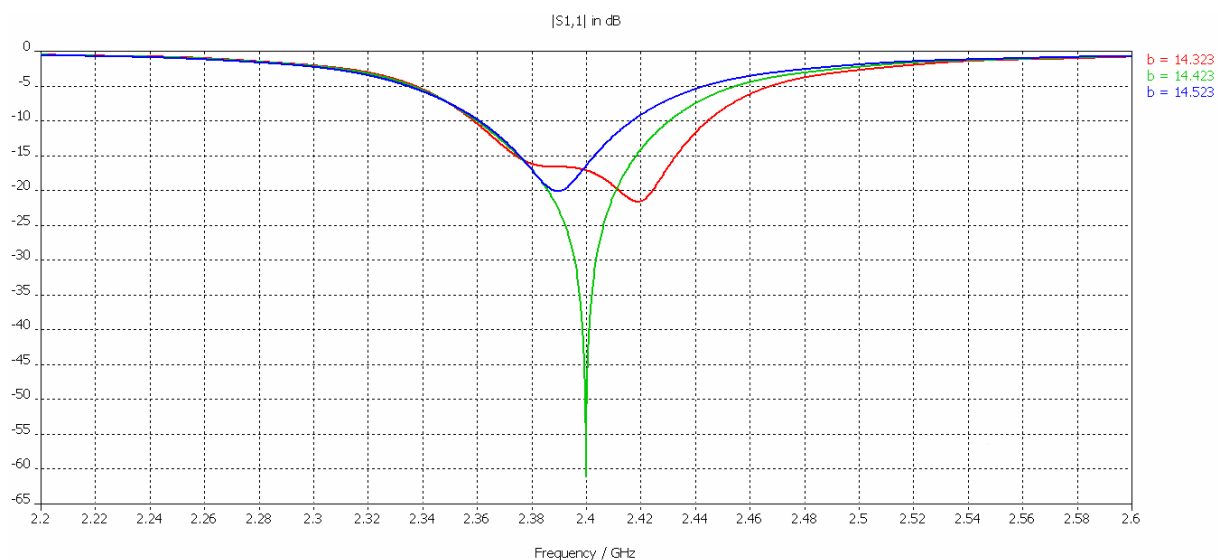


Obr. 3.23: Směrová charakteristika v 3D zobrazení pro substrát FR4 (CST)

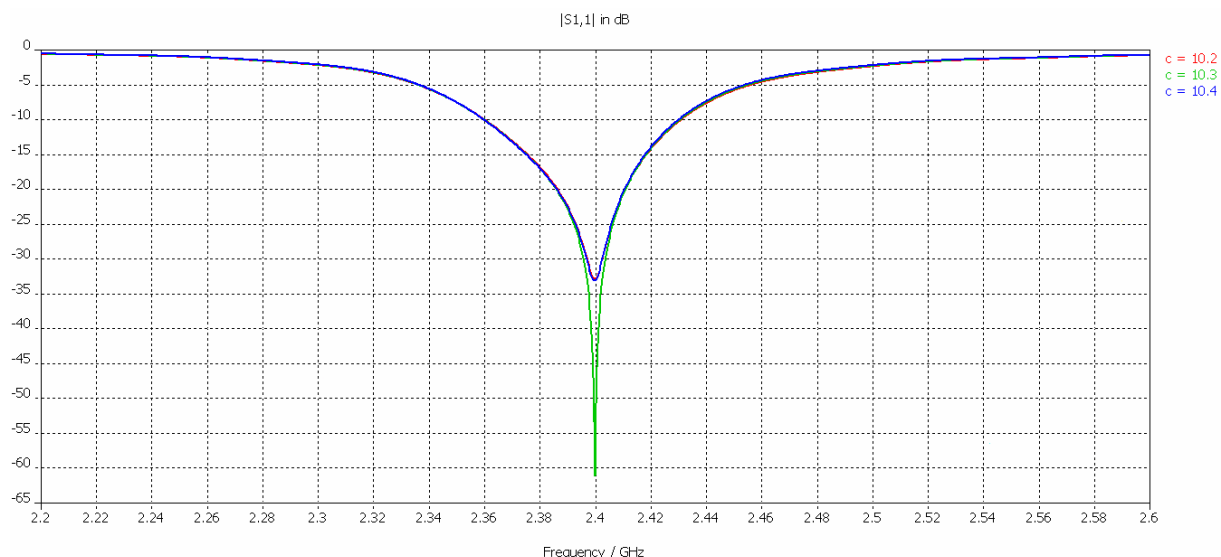


Obr. 3.24: Axiální poměr pro substrát FR4 (CST)

Takto navržená anténa má však několik podstatných nevýhod. Hlavními nevýhodami je velká úzkopásmovost a náročnost na přesnost výroby. Na obr. 3.25 a 3.26 je jasné vidět, že i velice malá změna rozměrů nebo posuv napájecího bodu, konkrétně o 0,1 mm, vyvolá velkou změnu výsledných charakteristik. Řešení tohoto problému je popsáno v kapitole 3.2.3.



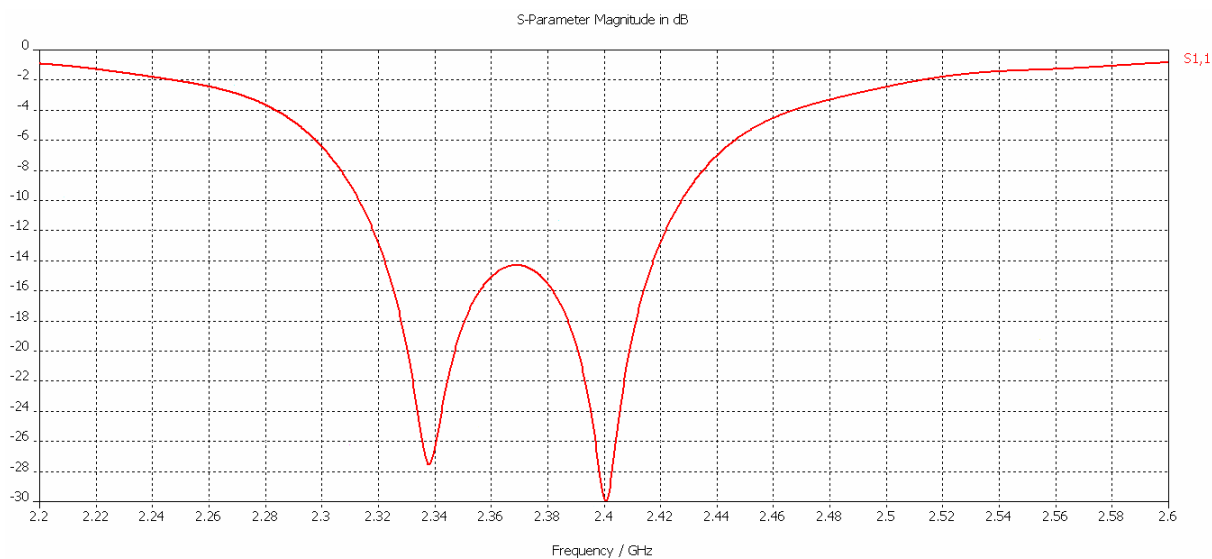
Obr. 3.25: Vliv změny parametru A na průběh S_{11}



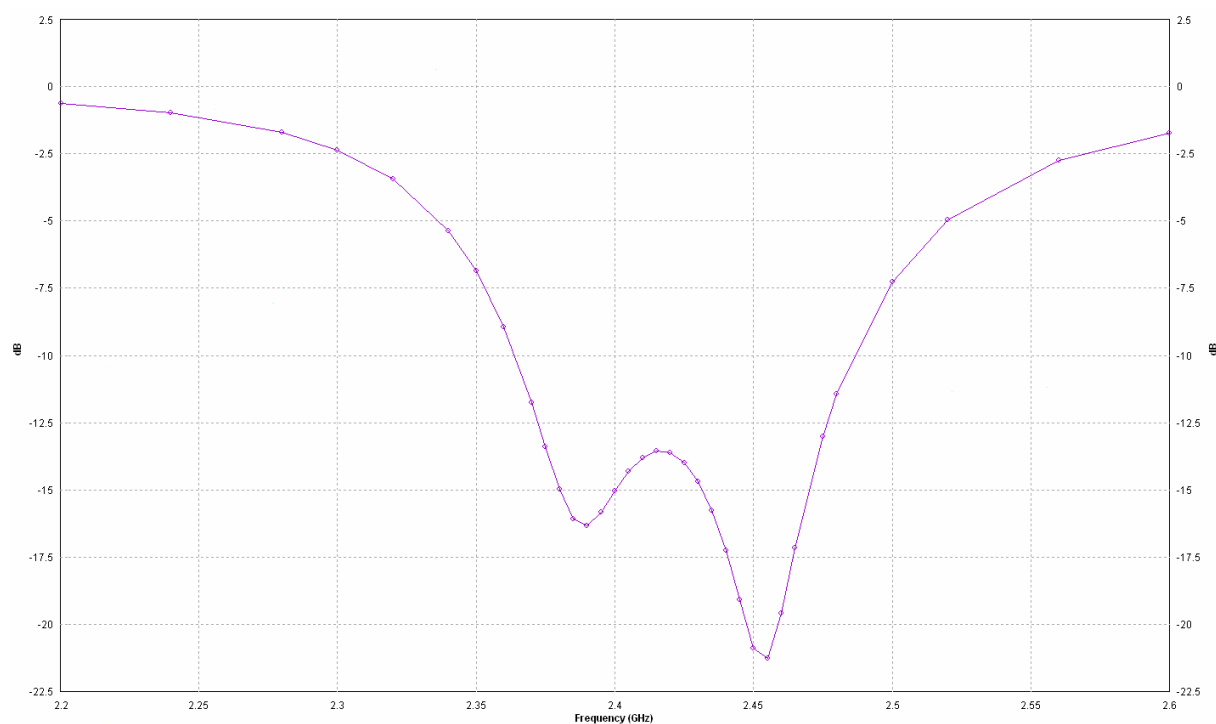
Obr. 3.26: Vliv změny parametru C na průběh S_{11}

3.2.3 Dva rezonanční kmitočty

Možností, jak zvýšit šířku pásma, je navrhnout anténu tak, aby rezonoval na dvou velice blízkých kmitočtech, což lze dosáhnout správnou kombinací rozměrů a polohy napájecího bodu. Výsledný průběh S_{11} programu CST antény s diskretním portem je na obr. 3.27. Pro srovnání je uveden na obr. 3.28 i průběh stejné antény simulovaný v programu IE3D. Rozdíly mohou být způsobeny rozdílnými metodami výpočtů, kdy program CST provádí simulaci v časové oblasti oproti programu IE3D, který pracuje ve frekvenční oblasti. Dále je také nutné vědět, že oba programy počítají s určitou přesností, která je dána tzv. meshováním, kdy program podle předem zadaných parametrů rozdělí oblast výpočtu na několik buněk. Toto rozdělení však může být u každého programu jiné.

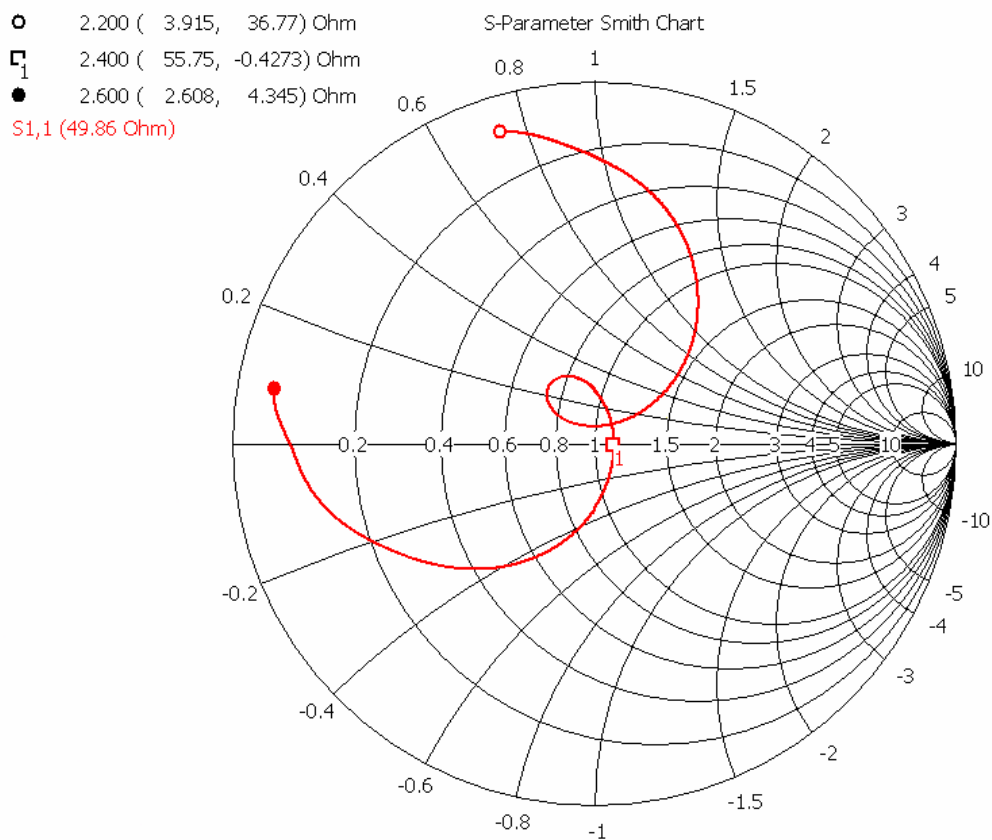


Obr. 3.27: Průběh S_{11} pro substrát FR4



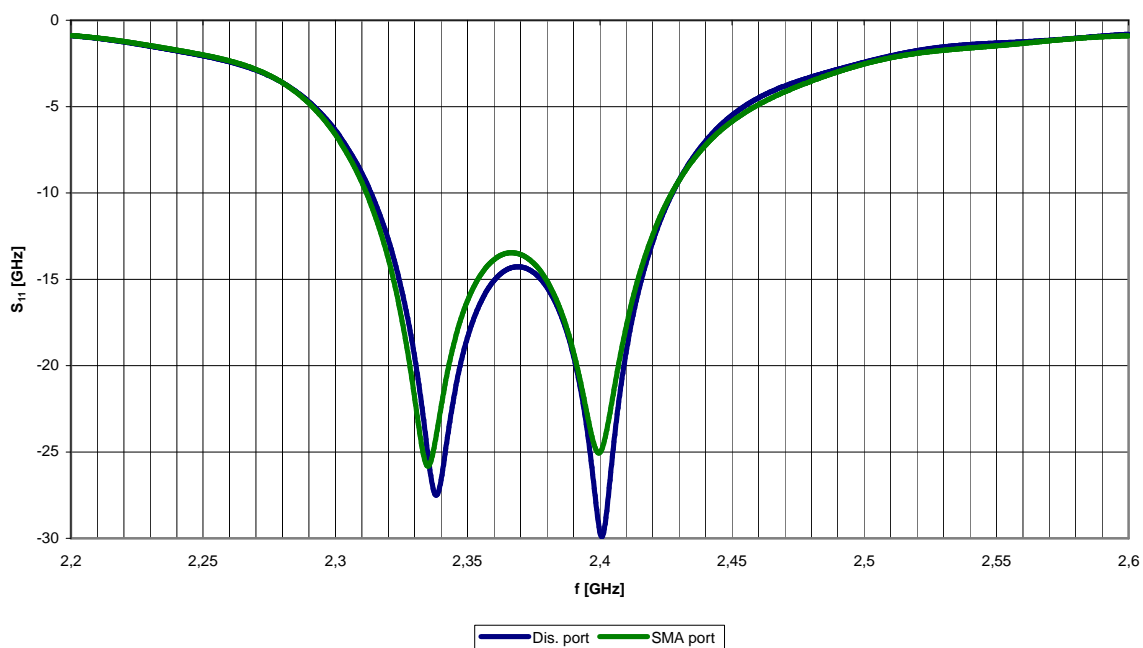
Obr. 3.28: Průběh S_{11} pro substrát FR4 v programu IE3D

Dále je vidět (obr. 3.29), jak se takový návrh projeví na zobrazení impedance ve Smithově diagramu.



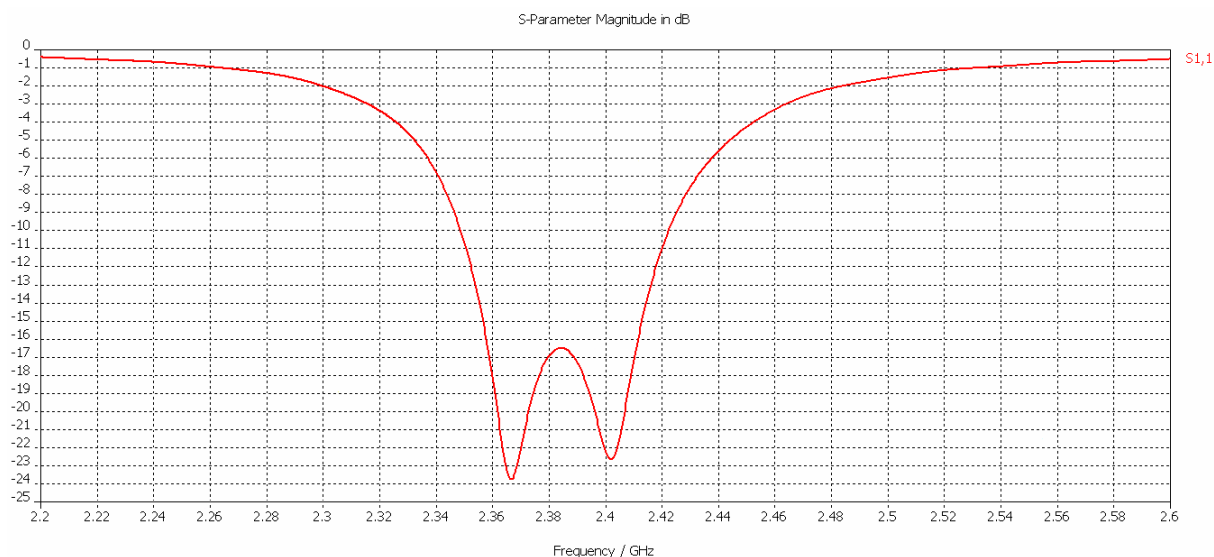
Obr. 3.29: Smithův diagram pro substrát FR4

Pro srovnání uvádím graf (obr. 3.30), na kterém je průběh S_{11} antény simulované s diskretním portem a antény s SMA konektorem. Z grafu je patrné, že oba průběhy jsou téměř totožné, což odpovídá teoretickým předpokladům.

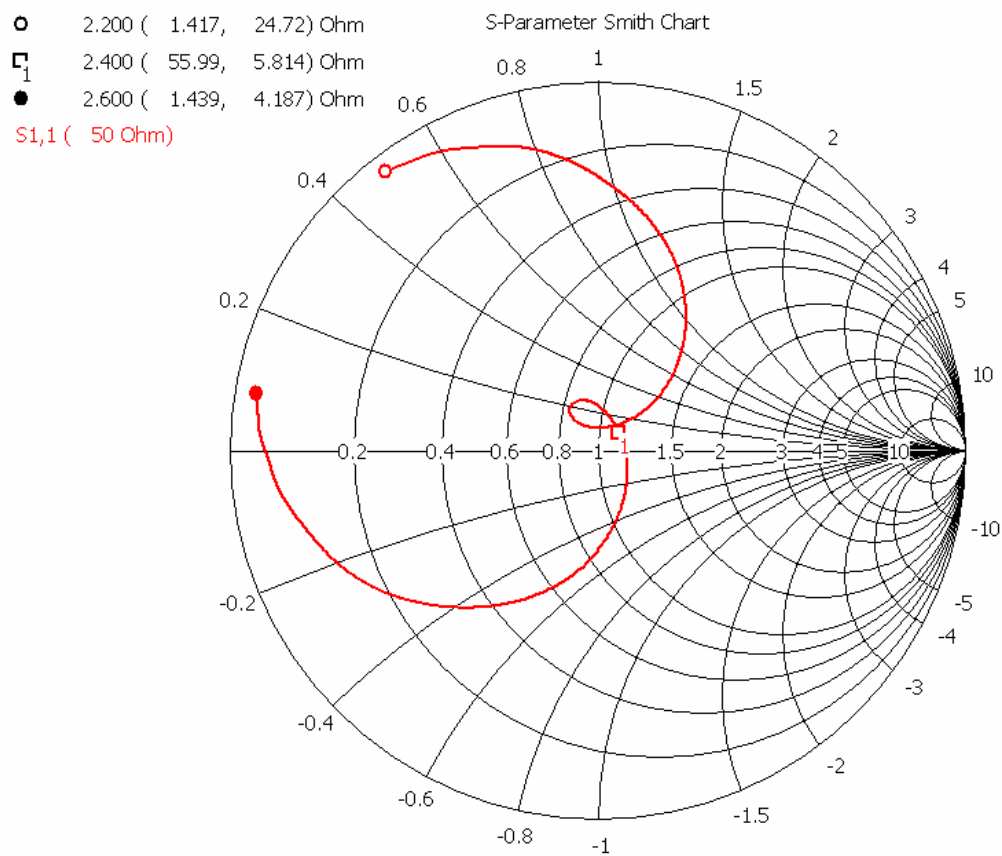


Obr. 3.30: Průběhy S_{11} pro substrát FR4

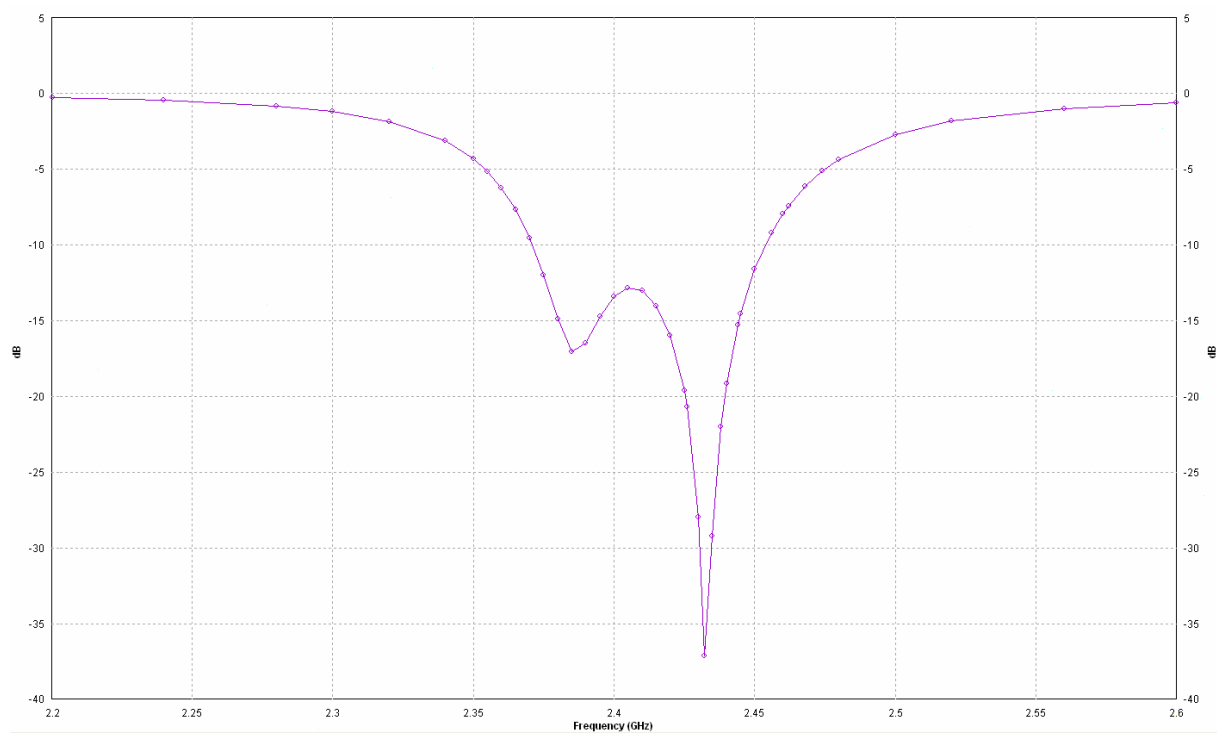
V kapitole 3.1 jsem popisoval důvod použití dvojice portů (jeden pro vysílání, druhý pro příjem) při jednobodovém napájení. U substrátu jako je FR4 tohle provedení není možné. Důvodem je hodnota ϵ_r a rezonančního kmitočtu. Ze vztahu (1) vyplývá, že čím jsou tyto hodnoty vyšší, tím menší je velikost antény. Proto se na anténu ze substrát FR4 při kmitočtu 2,4 GHz dva SMA konektory nevejdou. Řešením je použití substrátu s nižší hodnotou ϵ_r (CuClad 217) nebo použití dvojice antén. Porovnáním těchto dvou variant se budu podrobněji zabývat v kapitole 4.2. Ke srovnání bylo nutné navrhnout a vyrobit také antény ze substrátu CuClad 217. Postup byl naprosto stejný jako u substrátu FR4.



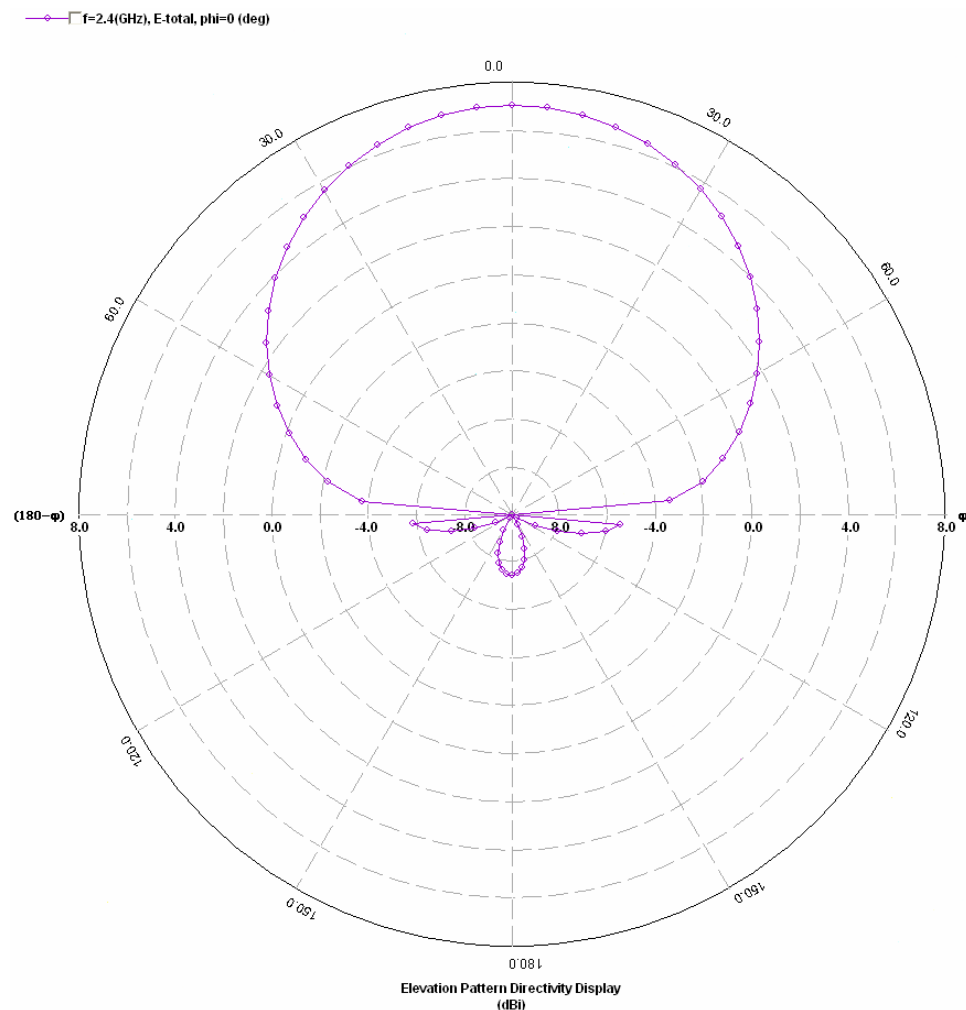
Obr. 3.31: Průběh S_{11} pro substrát CuClad 217



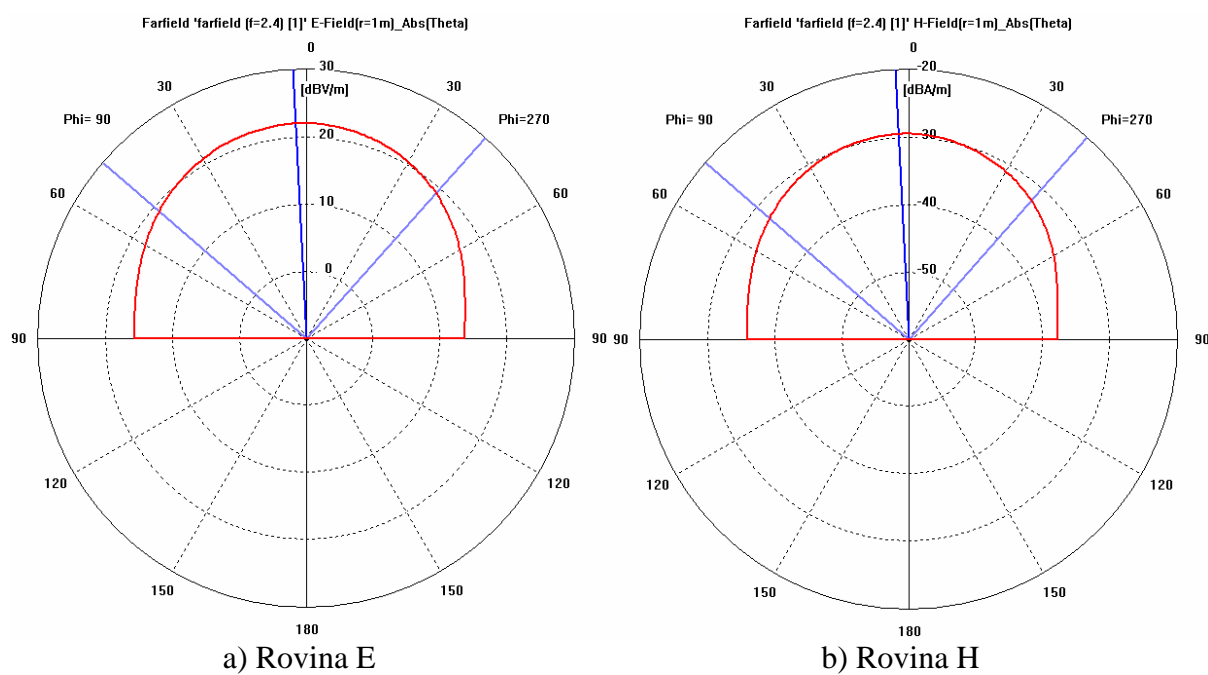
Obr. 3.32: Smitův diagram pro substrát Cuclad 217



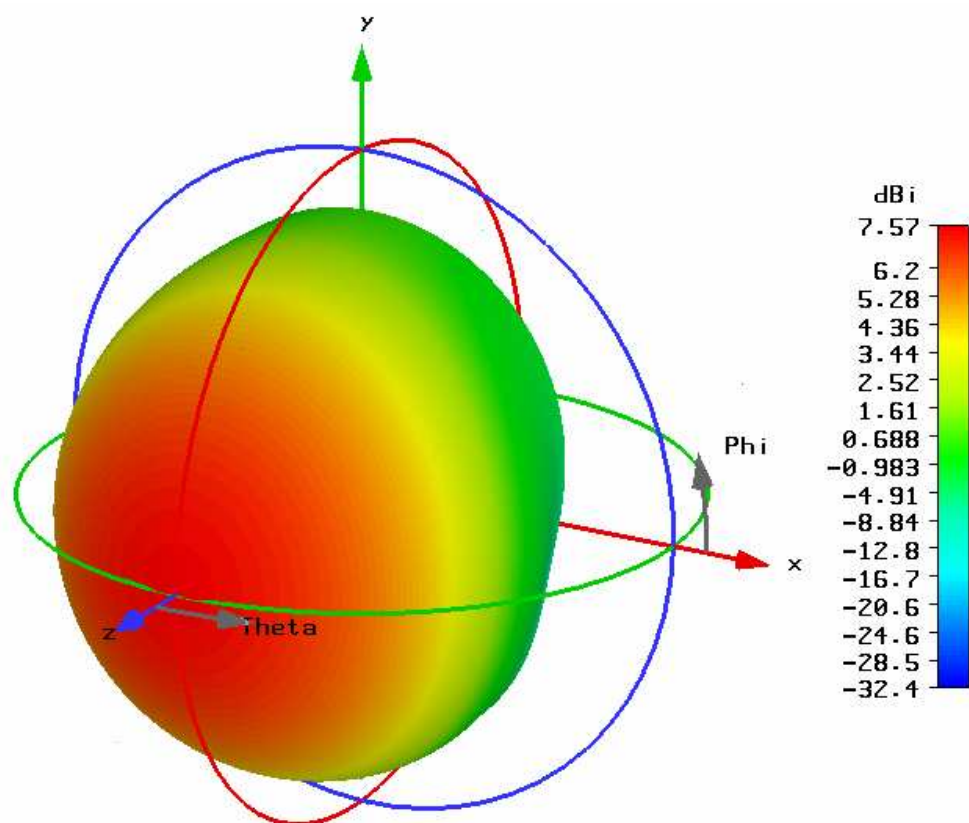
Obr. 3.33: Průběh S_{11} pro substrát CuClad 217 v programu IE3D



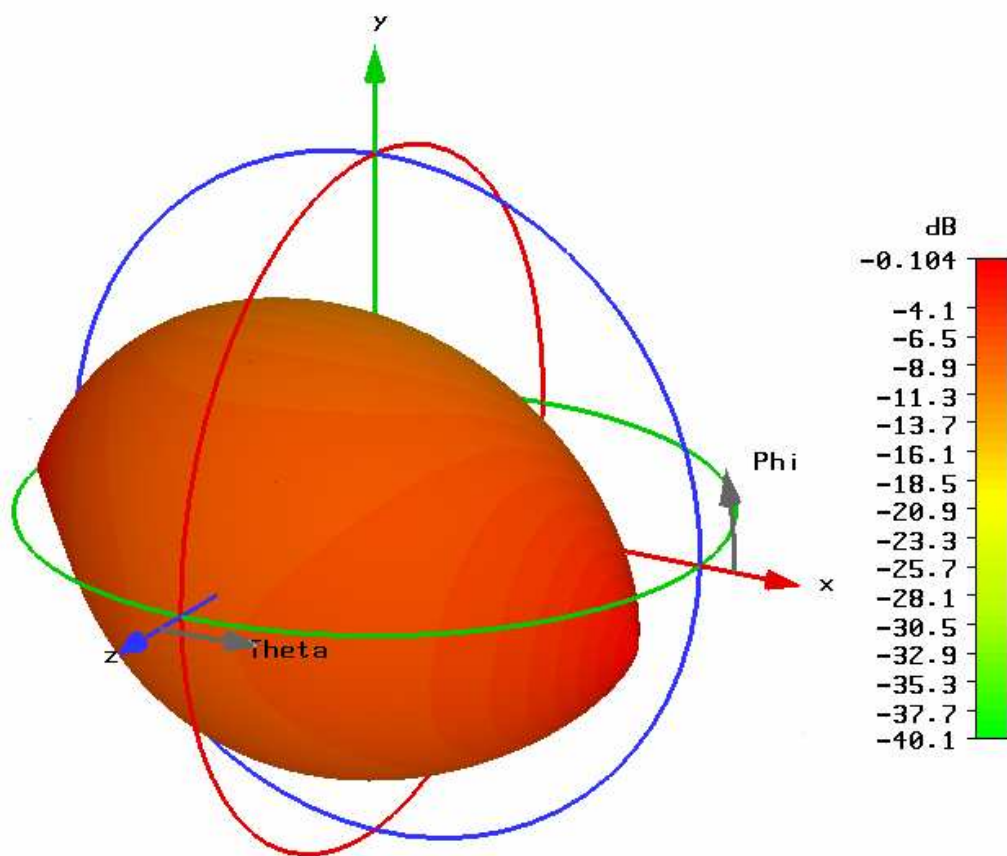
Obr. 3.34: Směrová charakteristika v polárních souřadnicích pro substrát CuClad 217(IE3D)



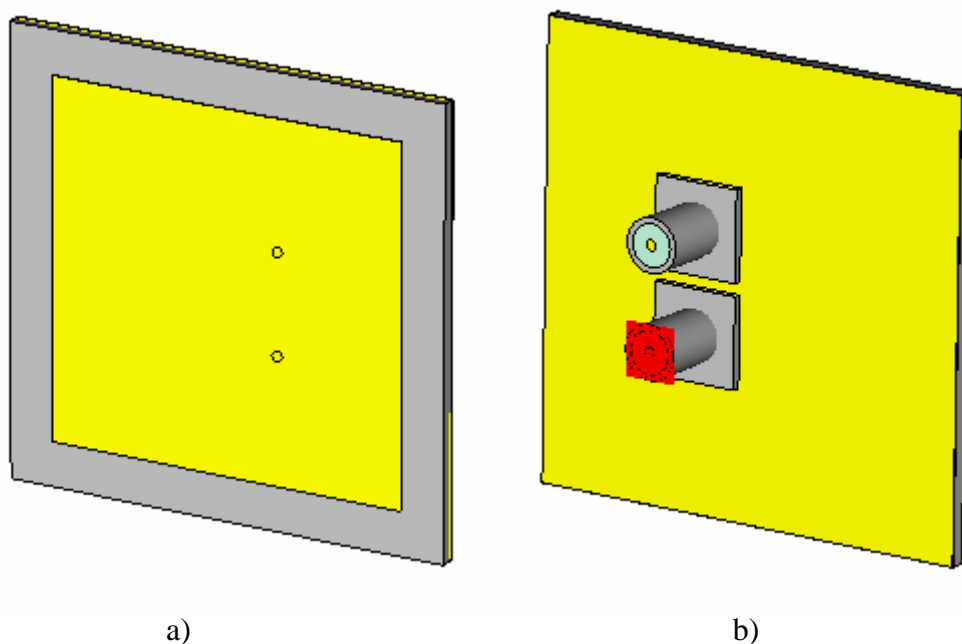
Obr. 3.35: Směrové charakteristiky v polárních souřadnicích pro substrát CuClad 217(CST)



Obr. 3.36: Směrová charakteristika v 3D zobrazení pro substrát Cuclad 217 (CST)

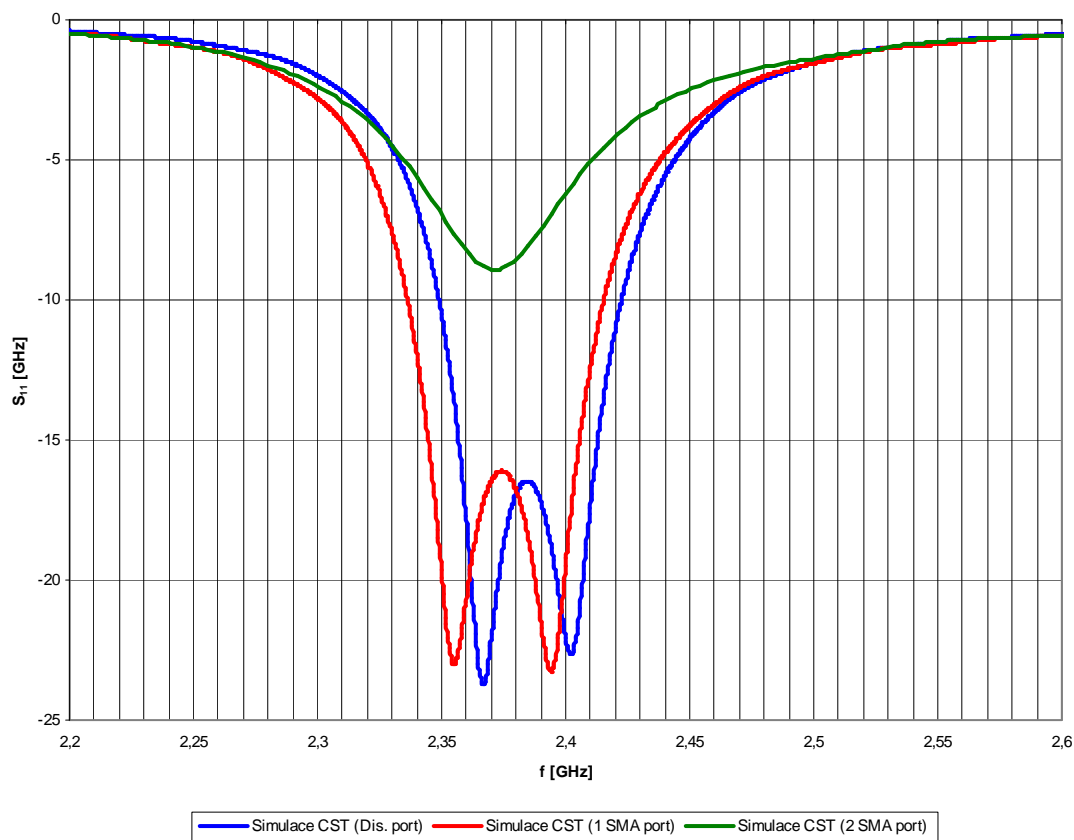


Obr. 3.37: Axiální poměr pro substrát Cuclad 217 (CST)



Obr. 3.38: Model skoro čtvercové antény z programu CST, a) pohled zepředu, b) pohled zezadu

Stejně jako u substrátu FR4 i zde uvádím srovnání průběhů S_{11} simulovaných antén s diskretním portem, s jedním SMA konektorem a se dvěma SMA konektory. Na obr. 3.39 je vidět znatelné zhoršení činitele odrazu právě u poslední varianty. Srovnání s naměřenými hodnotami je v kapitole 4.2.



Obr. 3.39: Průběhy S_{11} pro substrát CuClad 217

3.2.4 Vzduchové dielektrikum

Jako poslední jsem navrhl anténu se vzduchovým dielektrikem. Důvodem byla možnost relativně přesně vyrobit anténu, kterou je pak možno snadno upravit a doladit. Zemnicí plocha i patch je tvořen pocínovaným plechem a mezi nimi je dielektrikum tvořené vzduchem. Anténu jsem navrhoval na jeden rezonanční kmitočet. Výstupy simulací jsou velice podobné jako u antény ze substrátu FR4, proto je zde není nutné uvádět.

3.2.5 Výsledky simulací

V Tab. 2 a 3 jsou přehledně sepsány výsledky simulací antén, které byly vybrány k výrobě. Tab. 1 srovnává dvě antény navržené na jeden rezonanční kmitočet. Záměrně je anténa ze substrátu FR4 navržena s vyšší přesností, aby vynikl rozdíl činitele odrazu na rezonančním kmitočtu. Šířka pásma B_{-14} je vztažena k hodnotě $S_{11} = -14$ dB, což odpovídá PSV o hodnotě 1,5. Takovou hodnotu je možné brát jako hranici použitelnosti antény. Tab. 3 je velice podobná, jen s tím rozdílem, že srovnává antény navržené na dva rezonanční kmitočty.

	A	B	C	f_{REZ}	S_{11}	B_{-14}	G
	[mm]	[mm]	[mm]	[GHz]	[dB]	[MHz]	[dBi]
FR4	14,423	14,723	10,3	2,4	-61,09	47,5	6,17
Vzduch	27,2	28,4	17,6	2,4	-31,98	86,77	9,61

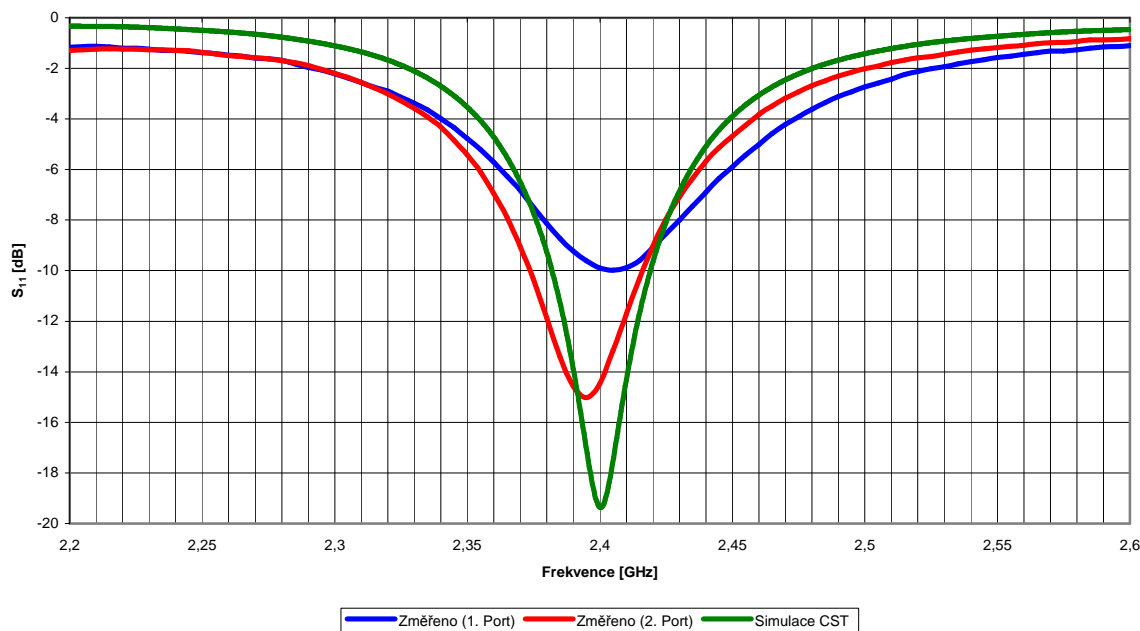
Tab. 3.2: Výsledky simulací pro jeden rezonanční kmitočet

		A	B	C	$f_{1\text{REZ}}$	S_{11}	$f_{2\text{REZ}}$	S_{11}	B_{-14}	G
		[mm]	[mm]	[mm]	[GHz]	[dB]	[GHz]	[dB]	[MHz]	[dBi]
FR4	Dis. port	14,4	15	9,5	2,338	-27,51	2,4	-29,91	95,1	6,17
	SMA port	14,4	15	9,5	2,335	-25,81	2,399	-25,06	96,1	6,15
CuClad	Dis. port	20,1	20,6	14,4	2,367	-23,74	2,402	-22,65	58,9	7,57
	1 SMA port	20,1	20,6	14,4	2,355	-22,99	2,394	-23,25	63,9	7,52
	2 SMA porty	20,1	20,6	14,4	2,371	-8,91	-	-	-	7,56

Tab. 3.3: Výsledky simulací pro dva rezonanční kmitočty

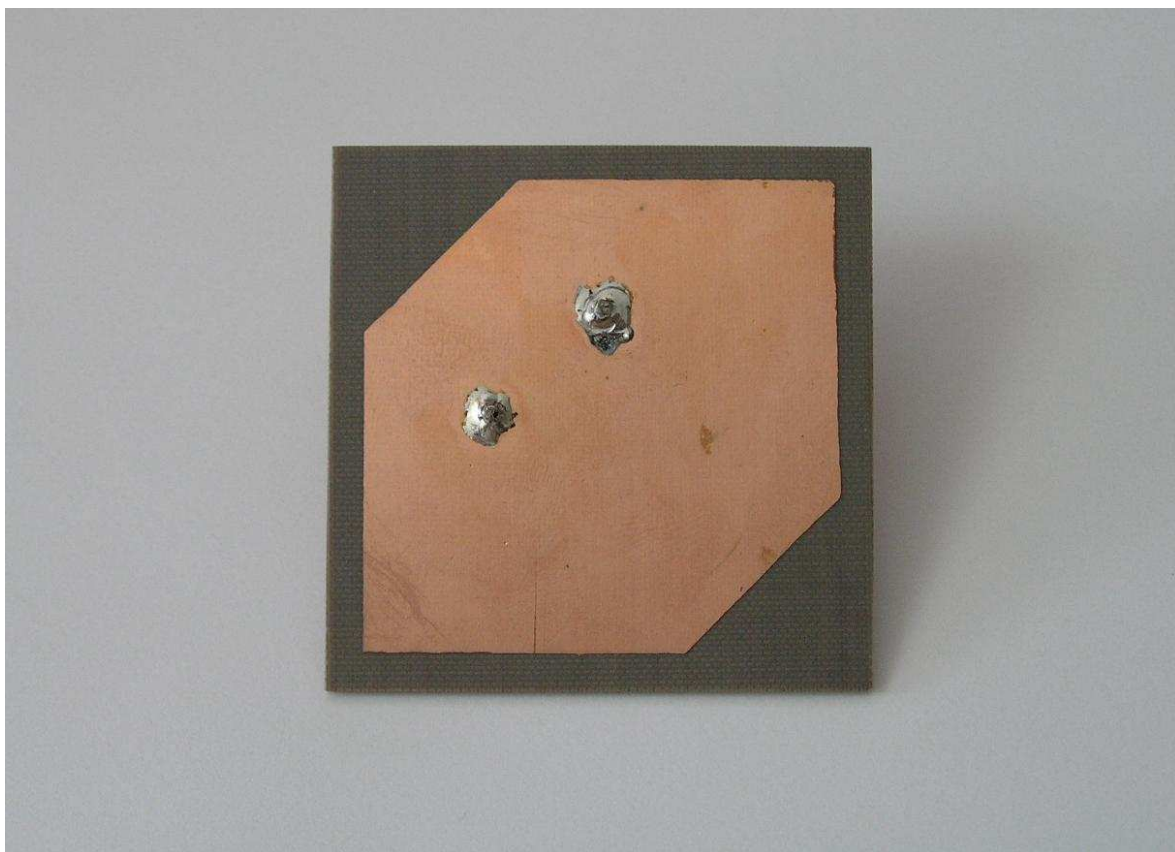
4 Srovnání s vyrobenou anténou

4.1 Oříznutá anténa

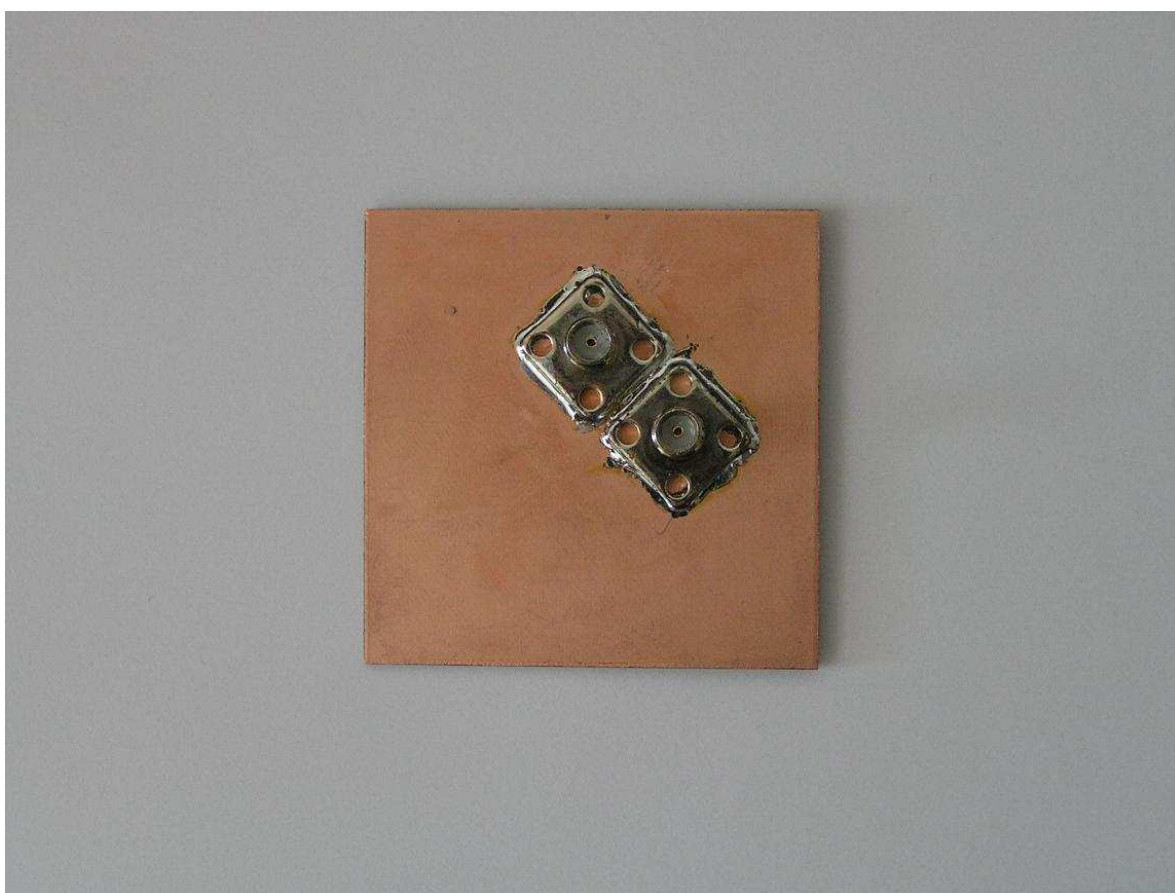


Obr. 4.1: Srovnání naměřených a simulovaných hodnot

Naměřené průběhy se od těch simulovaných liší. Největší problém spočívá v různých hodnotách pro Port 1 a pro Port 2. To je jednoznačně způsobeno nepřesným zhotovením antény, především různou vzdáleností jednotlivých portů od středu antény. Při stejné vzdálenosti by tyto průběhy musely být stejné. Vyrobená anténa je na obr. 4.2 a 4.3.

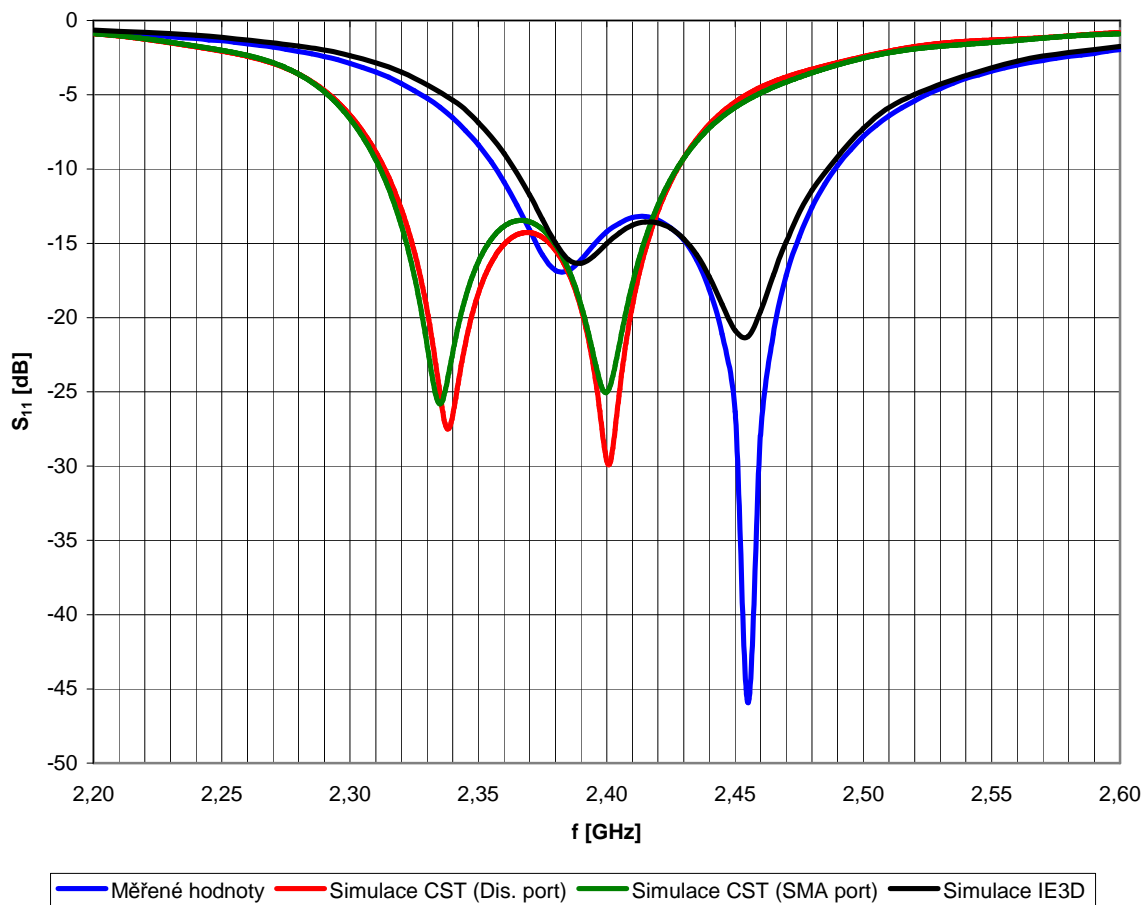


Obr. 4.2: Výrobek (pohled zepředu)



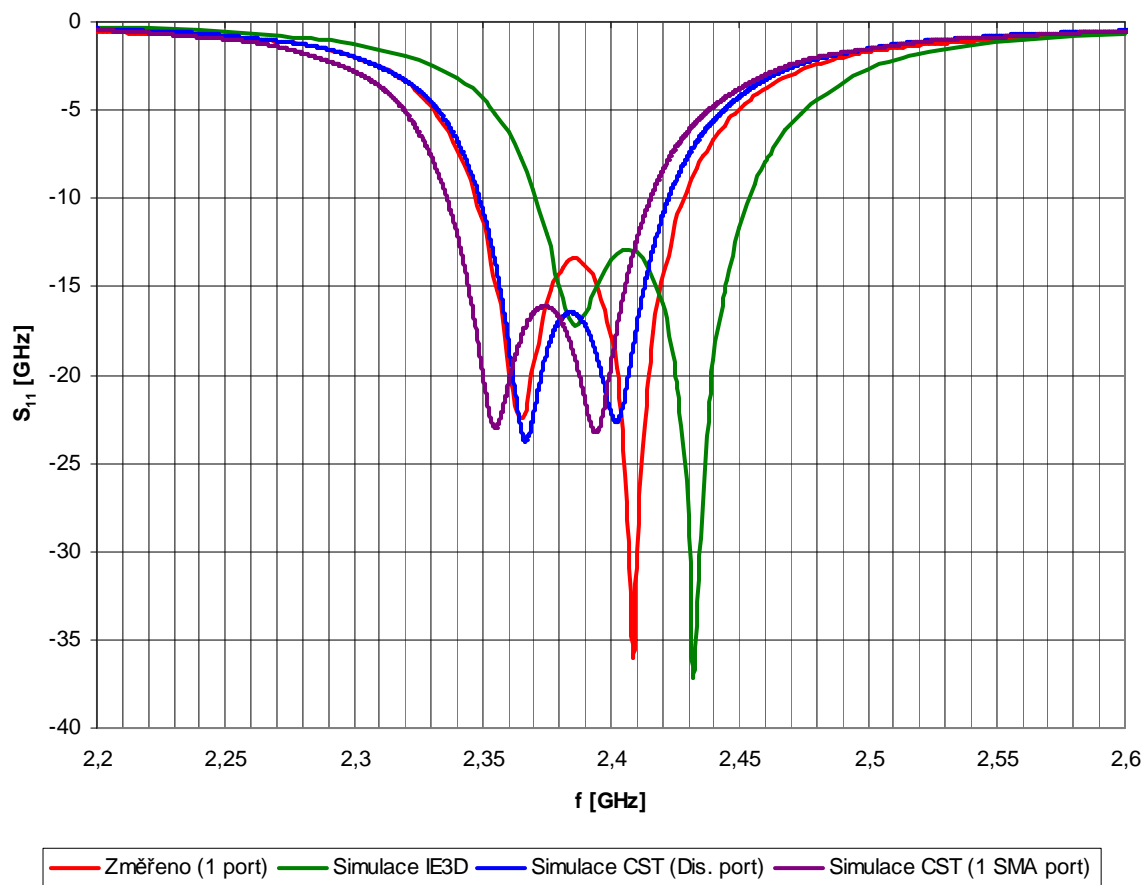
Obr. 4.3: Výrobek (pohled zezadu)

4.2 Skoro čtvercová anténa



Obr. 4.4: Srovnání naměřených a simulovaných hodnot (FR4)

Z obr. 4.4 je patrné, že naměřené hodnoty u antény vyrobené ze substrátu FR4 frekvenčně více odpovídají simulacím z programu IE3D. Impedanční přizpůsobení je dokonce lepší než u simulované antény. Dále z nich vyplývá, že anténa rezonuje na kmitočtech 2,385 a 2,455 GHz, a že požadovanému kmitočtu 2,4 GHz odpovídá činitel odrazu o hodnotě 14,2 dB, což je postačující hodnota.

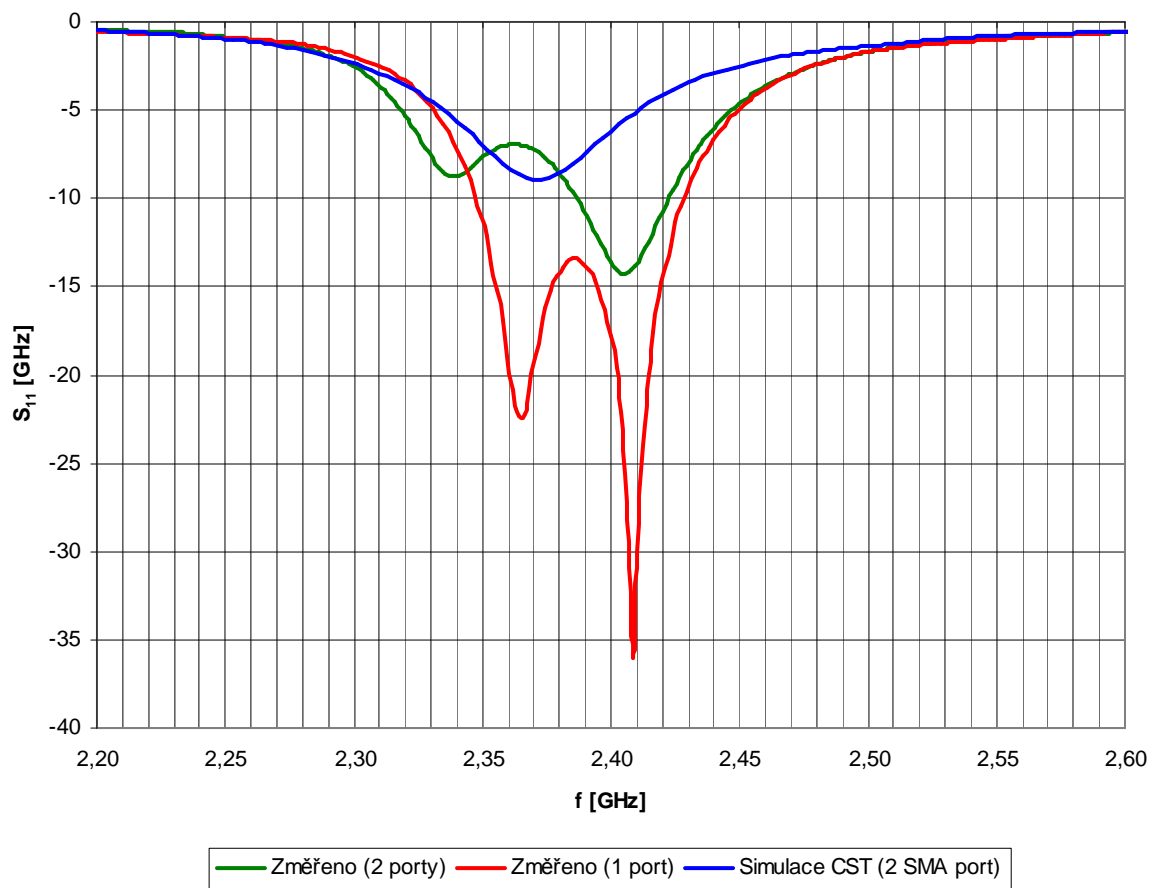


Obr. 4.5: Srovnání naměřených a simulovaných hodnot (CuClad)

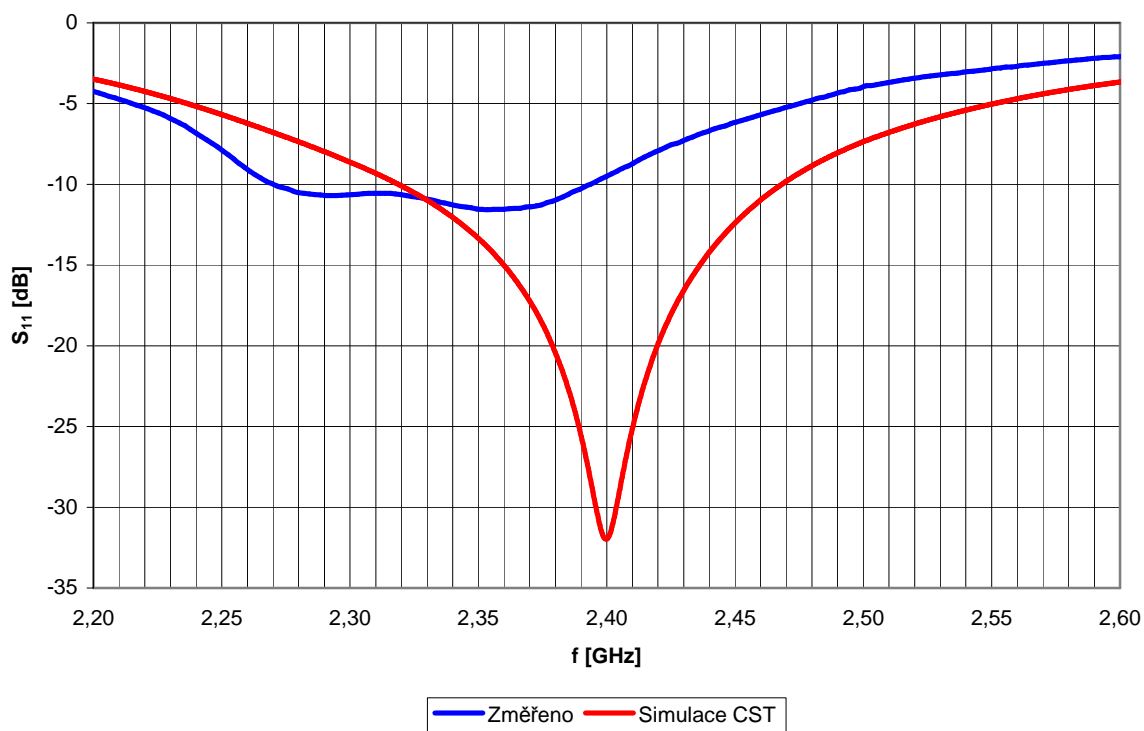
Na rozdíl od antény ze substrátu FR4 je u antény ze substrátu CuClad větší shoda se simulacemi z programu CST. V obou případech však byly všechny parametry výpočtů nastaveny u obou programů naprosto stejně. Důvodem mohou být rozdílné vlastnosti substrátů, nepřesná výroba, nepřesné měření nebo vše dohromady. Proto je vždy nutné provést simulace v několika různých programech. Skutečná anténa rezonuje na kmitočtech 2,364 a 2,408 GHz. Na požadovaném kmitočtu 2,4 GHz má činitel odrazu hodnotu -19,58 dB, což je velice dobrá hodnota.

Na dalším grafu (obr. 4.6) je srovnání naměřených hodnot na anténě s jedním SMA konektorem a se dvěma. Velký rozdíl vzniká vlivem horšího přizpůsobení antény při zapojení dalšího konektoru, protože ten není nijak zakončen a zhoršuje tak impedanční přizpůsobení antény. I přes to jsou naměřené hodnoty lepší než ty simulované.

Poslední graf (obr. 4.7) ukazuje výsledky měření na anténě se vzduchovým dielektrikem. Výsledky simulací příliš neodpovídají. Na vině je velká nepřesnost při výrobě antény, kdy je velmi obtížné dosáhnout stejné vzdálenosti pocínovaných plechů po celé ploše antény. Činitel odrazu má velkou hodnotu už při použití jediného SMA konektoru. Proto jsem se rozhodl druhý SMA konektor nepřidávat.



Obr. 4.6: Srovnání naměřených a simulovaných hodnot (CuClad)



Obr. 4.7: Srovnání naměřených a simulovaných hodnot (Vzduch)



Obr. 4.8: *Výrobky (pohled zepředu)*



Obr. 4.9: *Výrobky (pohled zezadu)*

5 Závěr

Během vypracování diplomové práce jsem využil znalostí nabytých v předmětech Elektromagnetické vlny, antény a vedení, CAD ve vysokofrekvenční a mikrovlnné technice, Směrové a družicové spoje. Často jsem také čerpal ze zdrojů uvedených v seznamu použité literatury.

Cílem práce bylo navrhnout a realizovat vhodnou mikropáskovou anténu s kruhovou polarizací na kmitočtu 2,4 GHz pro radiofrekvenční identifikaci (RFID). V první části diplomové práce jsou popsány všeobecné poznatky o mikropáskových anténách, kruhové polarizaci, možnostech napájení, používaných substrátech atd. Druhá část práce se zabývá návrhem a simulacemi antén, pomocí programů CST Microwave Studio a Zeland IE3D. V poslední části je uvedeno srovnání simulací s výsledky měření.

V rámci projektu byly simulovány různé typy provedení rezonančních mikropáskových antén na různých typech substrátů. Jedna z antén byla také navržena se vzduchovým dielektrikem. Mohl jsem tak názorně porovnat jejich vlastnosti a vzájemné výhody či nevýhody.

Velice špatně dopadla anténa vyrobená z pocínovaných plechů, mezi nimiž je jako dielektrikum vzduch. Výhodou tohoto provedení by měla být možnost relativně přesně vyrobit anténu, kterou je pak možno snadno upravit a doladit. V praxi se tato výhoda vůbec nepotvrdila.

Ze všech simulovaných a následně realizovaných antén nejlépe splňuje požadavky zadání skoro čtvercová anténa ze substrátu CuClad 217. Jako jediná splňuje požadavek vyrobit anténu s možností výběru typu polarizace při zachování použitelných parametrů. V provedení, které neumožňuje vybrat typ polarizace má dokonce velmi dobré parametry, které by obstály i v náročných aplikacích. Z tohoto pohledu by obstála i anténa vyrobená ze substrátu FR4. Oproti substrátu CuClad 217 má nevýhodu v menší přesnosti a stálosti parametrů. Na druhou stranu je několikrát levnější. Obě antény jsou mechanicky jednoduché a snadno realizovatelné. Bez jakýchkoliv úprav by pro RFID byla použitelná anténa ze substrátu CuClad 217.

Použitá literatura

- [1] PROCHÁZKA, M. Antény – Encyklopedická příručka. BEN, Praha 2000.
- [2] BALANIS, C. A. *Antenna Theory: Analysis and Design*. Chichester: J. Wiley and Sons, 1997.
- [3] GARG, R., BHARTIA, P., BAHL I., ITTIPIBOON, A.: *Microstrip antenna design handbook*. Artech House, Inc. Boston – London 2001.
- [4] SAINATI, R. A.: *CAD of Microstrip Antennas for Wireless Applications*, Artech House, Norwood, 1996.
- [5] HANUS, S., SVAČINA, J.: *Vysokofrekvenční a mikrovlnná technika*. Vysoké učení technické v Brně. Brno 2000.
- [6] NOVÁČEK, Z. *Elektromagnetické vlny, antény a vedení*. Skriptum FEKT VUT v Brně. Brno: Nakladatelství VUTUM, 2002.
- [7] Manuál programu Zeland IE3D, www.zeland.com